

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.А. Санников  
Н.В. Куцубина

# **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ**

Учебное пособие

Екатеринбург  
2015

УДК 676.05.001(075.8)

ББК 35.77-5я73

С 18

Рецензенты

Кафедра «Машины и автоматизированные системы» Санкт-Петербургского университета растительных полимеров; зав. кафедрой Гаузе А.А., канд. техн. наук, профессор

Ю.Д. Алашкевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты промышленных технологий» ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»

***Санников А.А., Куцубина Н.В.***

С 18 **Системный анализ при принятии решений:** учебное пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. – 137 с.

ISBN 978-5-94984-539-4

Рассматривается сущность системного анализа и системного подхода в исследовательской работе, при проектировании технологических процессов и оборудования, при организации и управлении производством. Анализируются методы прогнозирования и оптимизации параметров, технического уровня и качества оборудования и технологии, принятия технических и управленческих решений. Пособие может быть полезно обучающимся при изучении дисциплины и в исследовательской работе, а также специалистам промышленных предприятий.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет».

УДК 676.05.001(075.8)

ББК 35.77-5я73

ISBN 978-5-94984-539-4

© ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2015

© Санников А.А., Куцубина Н.В. 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Общие сведения о системном анализе. Термины и определения</b>	<b>6</b>
1.1. Сущность системного анализа .....	6
1.2. Принятие решений на основе системного подхода .....	11
1.3. Свойства систем .....	14
1.4. Методы поиска решений.....	15
<b>2. Системный подход при проектировании и эксплуатации машин и оборудования .....</b>	<b>19</b>
2.1. Понятие о технике и технической системе.....	19
2.2. Фазы и закономерности развития, классификация машин.....	21
2.3. Основные принципы и тенденции при конструировании машин	27
2.4. Качественные показатели машин.....	32
2.5. Системотехника при проектировании сложных технических систем .....	40
2.6. Системный подход при организации технической эксплуатации машин и оборудования .....	41
2.7. Системный подход к административному управлению предприятием .....	46
<b>3. Методы прогнозирования развития систем .....</b>	<b>48</b>
3.1. Классификация методов прогнозирования .....	49
3.2. Методы экстраполяции .....	52
3.3. Методы аналогий .....	64
3.4. Опережающие методы прогнозирования .....	67
3.5. Экспертные методы прогнозирования .....	69
3.6. Оценка достоверности и точности прогноза .....	71
3.7. Прогнозирование технического уровня и качества машин и оборудования .....	72
3.8. Прогнозирование ресурса оборудования при его эксплуатации	74
<b>4. Оптимизация технических и управленческих решений .....</b>	<b>82</b>
4.1. Задачи и математические модели оптимизации .....	82
4.2. Методологические основы оптимизации .....	87
4.3. Методы безусловной оптимизации технических решений .....	93
4.4. Линейное программирование .....	99
4.5. Нелинейное программирование при решении задач оптимизации.....	110

4.6. Примеры оптимизации технических решений при проектировании и эксплуатации технологического оборудования ЦБП	116
<b>5. Общие сведения о принятии решений в условиях неопределенности. Система качества</b> .....	124
5.1. Принятие решений в условиях риска .....	125
5.2. Методы теории игр при принятии решений .....	126
5.3. Система менеджмента качества .....	130
<b>Библиографический список</b> .....	135

## ВВЕДЕНИЕ

*Знание некоторых принципов  
легко возмещает незнание  
некоторых фактов.*

Клод Гельвеций  
(1715–1771 гг.)

Системный анализ относится к направлениям современной науки управления, которая возникла в период обострения социальных, экономических, технических, политических проблем, вызывавших необходимость поиска и обоснования новых решений в различных областях деятельности. Причем решения в науке, в управлении производством, при проектировании и технической эксплуатации машин, оборудования, сооружений должны приниматься быстро с минимальным риском ошибок. Этому способствует системный анализ, системный подход при решении конкретных научных, управленческих, проектных и других технических задач.

Наука и практика по системному анализу бурно развиваются. Появились статьи, учебники, пособия, монографии по системному анализу в науке и технике, экономике, в управлении и менеджменте, в других направлениях деятельности [1–18]. Разрабатывается математический аппарат системного анализа, в частности, методы исследования операций. В вузах различного профиля в учебные планы подготовки бакалавров, магистров, аспирантов вводят целиком или отдельные фрагменты системного анализа, системного подхода при решении конкретных проблем.

Основные (базовые) разделы системного анализа – это прогнозирование развития систем, оптимизация технических и управленческих решений, теоретические основы принятия решений в условиях определенности, а также полной или частичной неопределенности. Дополнительными разделами могут быть системные подходы при решении конкретных проблем.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. Сущность системного анализа

Существует значительное количество противоречивых определений термина «система». В БСЭ этот термин трактуется следующим образом: «Система (*от греч. systema – целое, состоящее из частей; соединение*) – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство». Простое и наглядное определение, в котором подчеркивается единство трех составляющих системы: элементов, связей, операций.

Системой называется упорядоченная совокупность материальных объектов (элементов), объединенных какими-либо связями (механическими, информационными и др.) и предназначенных для достижения определенной цели.

Системный анализ есть совокупность средств научного познания и прикладных исследований, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам социально-экономического и научного характера. При системном анализе в условиях неопределенности существенное значение имеет принятие решений в условиях полного или частичного отсутствия информации, когда имеется риск принятия неправильных, ошибочных решений.

Системный анализ – наука, занимающаяся проблемой принятия решений в условиях анализа большого количества информации различной природы. В системном анализе выделяют методологию, аппаратную реализацию, практические приложения. Методология включает определения используемых понятий и принципы системного подхода.

С необходимостью принятия решений человек был связан всегда, зачастую на инициативном уровне.

Началом науки «Теория принятия решений» следует считать работу Жозефа Луи Лагранжа, смысл которой заключался в следующем: сколько земли должен брать на лопату землекоп, чтобы его сменная производительность была наибольшей. Оказалось, что утверждение «бери больше, кидай дальше» не верно.

Бурный рост технического прогресса ставил задачи, для решения которых привлекались и разрабатывались научные методы. Научно-технические предпосылки становления «Теории принятия решений»:

– удорожание «цены ошибки». Чем сложнее, дороже, масштабнее планируемое мероприятие, тем менее допустимы в нем «волевые» решения и тем важнее становятся научные методы, позволяющие заранее оценить последствия каждого решения;

– ускорение научно-технической революции техники. Жизненный цикл технических решений сократился, «опыт» не успевает накапливаться, и требуется применение математического аппарата в проектировании;

– возникновение и развитие ЭВМ позволили ускорить решение задач, не используя аналитические методы.

Инженерное дело связано со сложными системами, которые характеризуются многочисленными и разнообразными по типу связями между отдельно существующими элементами системы и наличием у системы функции назначения, которой нет у составляющих ее частей.

Каждая научная дисциплина имеет свой характерный глоссарий. Рассмотрим основные понятия, термины и определения, применяемые при системном анализе.

### **Основные понятия системного анализа**

Наиболее общий термин «теория систем» относится ко всевозможным аспектам исследования систем. Ее основные части: *системный анализ*, под которым понимается исследование проблемы принятия решения в сложной системе, и *кибернетика*, рассматриваемая как наука об управлении и преобразовании информации.

Следует заметить, что понятия «управление» и «принятие решения» не совпадают. Условная граница между кибернетикой и системным анализом состоит в том, что первая изучает отдельные процессы, а системный анализ – совокупность процессов и процедур.

*Элемент* – некоторый объект (материальный, энергетический, информационный), который имеет ряд важных для нас свойств, но внутреннее строение (содержание) которого безотносительно к цели рассмотрения.

*Связь* – важный для целей рассмотрения обмен между элементами, веществом, энергией, информацией.

*Система* – совокупность элементов, которая обладает связями, позволяющими посредством переходов по ним от элемента к элементу соединить два любых элемента совокупности.

*Большая система* – система, которая включает значительное число однотипных элементов и однотипных связей, например система смазки подшипников бумагоделательной машины.

*Сложная система* – система, которая состоит из элементов разных типов и обладает разнородными связями между ними. В качестве примера можно привести бумагоделательную машину, состоящую из нескольких взаимосвязанных составных частей (формующей, прессовой, сушильной) и систем (массоподводящей, вакуумной, смазки и др.).

*Автоматизированная система* – сложная система с определяющей ролью двух элементов: технических средств и действий человека. Типична

ситуация, когда решение, выработанное техническими средствами, утверждается к исполнению человеком.

*Структура системы* – расчленение системы на группы элементов с указанием связей между ними, неизменное на все время рассмотрения и дающее представление о системе в целом. Расчленение может иметь материальную, функциональную, алгоритмическую и другую основу.

### **Основные понятия исследования операций**

*Операцией* называется мероприятие (система действий), объединенное единым замыслом и направленное к достижению какой-то цели.

*Цель исследования операций* – предварительное количественное обоснование решений, под которым понимается любой выбор зависящих от нас параметров.

Параметры, совокупность которых образует решение, называются *элементами решения*. Оптимальными называются решения, по тем или другим признакам предпочтительные перед другими. Множеством допустимых решений называются заданные условия, которые фиксированы и не могут быть нарушены.

*Декомпозиция* – деление системы на части, удобное для каких-либо операций с этой системой. Примерами будут разделение объекта на отдельно проектируемые части, зоны обслуживания, рассмотрение физического явления или математическое описание отдельно для данной части системы.

*Иерархия* – структура с наличием подчиненности, т.е. неравноправных связей между элементами, когда воздействие в одном из направлений оказывает гораздо большее влияние на элемент, чем в другом.

*Принципы системного подхода* – это положения общего характера, являющиеся обобщением опыта работы человека со сложными системами. Известно около двух десятков таких принципов, важнейшими из которых являются:

- принцип конечной цели – абсолютный приоритет конечной цели;
- принцип единства – совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности элементов;
- принцип связности – рассмотрение любой части совместно с ее связями с окружением.

*Показатель эффективности* – количественная мера, позволяющая сравнивать разные решения по эффективности.

Задача называется *статической*, если принятие решения происходит в наперед известном и неизменяющемся информационном состоянии. Если информационные состояния в ходе принятия решения сменяют друг друга, то задача называется *динамической*.



Аппаратная реализация включает стандартные приемы моделирования принятия решения в сложной системе и общие способы работы с этими моделями. Модель строится в виде связанных множеств отдельных процедур. Системный анализ исследует как организацию таких множеств, так и вид отдельных процедур, которые максимально приспособливают для принятия управленческих решений в сложной системе.

Отдельные процедуры (операции) принято классифицировать на формализуемые и неформализуемые. Системный анализ допускает, что в определенных ситуациях неформализуемые решения, принимаемые человеком, являются более предпочтительными.

### ***Терминология и свойства системы***

*Внешняя среда.* Понятие «система» предусматривает границу между некоторым ограниченным множеством элементов. Элементы, которые остались за пределами границы, образуют множество, называемое внешней средой. Всякая система может рассматриваться, с одной стороны, как подсистема более высокого порядка (надсистемы), а с другой, – как надсистема системы низшего порядка.

*Функциональность* – это проявление отдельных свойств (функций) системы при взаимодействии с внешней средой.

*Структура системы* – это способ существования системы и выражения ее функции.

*Целостность* – это выражение внутреннего единства объекта, наличия всех необходимых элементов со связями между ними, относительной автономности объекта в смысле независимости от окружающей среды.

*Связи* – это элементы, осуществляющие непосредственное взаимодействие между элементами (или подсистемами) системы, а также с элементами и подсистемами окружения. Связи различают по характеру взаимосвязи (прямые и обратные) и по виду проявления (детерминированные и вероятностные).

*Критерии* – признаки, по которым проводится оценка соответствия функционирования системы желаемому результату (цели) при заданных ограничениях.

*Эффективность системы* – соотношения между заданным показателем результата функционирования системы и фактически реализованным.

Техническая система имеет стабильно выраженную целевую функцию. Различают простые технические системы, в которых поддержание эффективности осуществляется регулированием процессов, и сложные, в которых эффективность поддерживается регулированием параметров. Функционально техническая система состоит из трех блоков: *вход – процесс – выход*.

*Вход* – все, что изменяется при протекании процесса (функционирования системы).

*Выход* – результат конечного состояния процесса.

*Процесс* – переход входа в выход.

*Вход* и *выход* располагаются на границе системы и выполняют одновременно функции входа и выхода предшествующих и последующих систем. Управление системой связано с понятием прямой и обратной *связи* ограничениями.

Обратная связь предназначена для воздействия на *вход*.

Определение функционирования системы связано с понятием «проблемной ситуации», которая возникает, если имеются различия между необходимым (желаемым) и существующим (реальным) входом. *Проблема* – это разница между существующей и желаемой системами. Если этой разницы нет, то и нет проблемы. Решить проблему – значит скорректировать старую систему или сконструировать новую, желаемую.

Системный анализ предполагает разделение проблемы на подпроблемы с последующим рассмотрением этих подпроблем в условиях определенности или неопределенности.

Между компонентами множества, образующего систему, существуют системообразующие связи и отношения, благодаря которым реализуется специфическое для системы единство.

*Отношения* отличаются от связей тем, что не имеют ярко выраженного вещественно-энергетического характера. Тем не менее, их учет важен для понимания той или иной системы. Отношения могут быть, например, пространственные (выше, ниже, левее, правее), временные (раньше, позже), количественные (меньше, больше).

Состояния и фазы функционирования важны для анализа действующих на протяжении длительного времени систем. Сам процесс функционирования познается путем выявления связей и отношений между различными состояниями.

Любая система существует лишь в определенных границах изменений ее свойств, поэтому обычно задаются максимальные и минимальные значения ее переменных. Сложная система — это результат эволюции более простой системы. Система не может быть изучена, если не изучен ее генезис.

Познание того или иного объекта как системы должно включать в себя следующие определения: структура и организация системы, собственные (внутренние) интегральные свойства и функции системы, функции системы как реакции на выходы в ответ на воздействие других объектов на входы, генезис системы, т.е. способы и механизмы ее образования, а для развивающихся систем — способы их дальнейшего развития.

Управление в системах делится на три типа: *самосохранение*, *саморазвитие* и *самовоспроизведение*. В случае самосохранения конечная цель

управления заключается в сохранении целостности, качественной определенности системы. Саморазвитие же предполагает изменение структуры. Система, саморазвиваясь, может изменять свой тип целостности, качественной определенности, оставаясь в то же время сама собой.

Еще более сложный тип управления — самовоспроизведение. Он свойствен живым организмам и обществу (экономике, науке, культуре и т.д.). Имеются и первые искусственные самовоспроизводящиеся системы — компьютерные вирусы, относящиеся не к классу устройств, а к чисто информационным образованиям. Общим для всех процессов самовоспроизводства является то, что при сохранении или даже увеличении информационного содержания одной системы ею порождается другая система, как правило, способная к саморазвитию. Иными словами, информация от первой системы не отбирается, а дублируется, причем частично. Потомок создается не как законченная и точная копия предка, а как «заготовка», наследующая лишь главные особенности структуры и способная самостоятельно накапливать информацию. Предок и потомок — это две различные системы, занимающие различные области в пространстве и существующие в различные промежутки времени. Поэтому то тождество, которое существует между ними (генетическое тождество третьего рода), имеет еще более высокий разряд.

При принятии решений в условиях неопределенности используются теоретико-игровые модели, сущность которых будет рассмотрена далее.

Прогрессивное развитие системы сопровождается качественными скачками. Поэтому прогресс системы сопровождается не только количественным ростом параметров, но и изменением ее качества. Это позволяет вводить в рассмотрение качественные информационные критерии развития.

## **1.2. Принятие решений на основе системного подхода**

Сознательная жизнь человека, особенно творческая деятельность, представляет непрерывную последовательность принятия решений по многим вопросам и проблемам, вызываемым потребностью общества и его лично.

Принятие решений в философском понимании представляется как диалектико-материалистический процесс познания, идущий по пути обнаружения и преодоления противоречий. Это представление согласуется с теорией познания истины в известной триаде: чувственное восприятие — абстрактное мышление — практика.

Представим алгоритмы процесса принятия решения с различных позиций философии, системного подхода и разнообразных практических методов (табл. 1.1). Из таблицы видно, что просматривается единая диалектико-материалистическая суть и принципиальная сквозная схема поиска —

от постановки задачи через вскрытие противоречий к их разрешению (преодолению) и, наконец, осмыслению результата.

Таблица 1.1

Алгоритм принятия решения на основе системного подхода

Термин	Постановка задачи	Вскрытие противоречий	Преодоление противоречий	Осмысление результата
Философия	Теория познания	Чувственное познание	Абстрактное мышление	Практика
Системный подход	Исследование потребности. Постановка цели и уяснение задачи. Анализ структуры системы (целостность, элементы, связи, взаимодействие со средой, функциональность). Выбор и обоснование критериев оценки результата; анализ с позиций надсистемы	Построение и анализ дерева противоречий. Анализ структуры системы по принципу иерархичности: управляющие и управляемые элементы и подсистемы. Анализ влияния окружающей среды на систему	Поиск концепций системы. Построение и анализ дерева функций системы. Функциональные и конструктивные модули системы. Системотехника	Оценка решения. Обратные связи. Воздействие выхода на вход

Рассматриваемые методы принятия решений условно разделим на две группы: общие, охватывающие неограниченно широкий круг проблем, и более частные, относящиеся к синтезу новых технических объектов, т.е. непосредственно к инженерной деятельности.

Факторы, учитываемые при принятии решения:

– лицо (лица), принимающее решение (ЛПР), т.е. тот, кому предстоит решать проблемы, может быть как отдельным индивидуумом, так и небольшой группой людей и даже большим коллективом;

– управляемые переменные, т.е. параметры и ситуации, которыми может управлять ЛПР;

- неуправляемые переменные, которыми не может управлять ЛПР; в совокупности эти переменные образуют «окружающую среду», или фон проблемы;

- внутренние либо внешние ограничения на возможные значения управляемых и неуправляемых переменных;

- возможные исходы (решения, результат) – должно быть не менее двух неравноценных, так как в противном случае не имеет значения, какое решение принять.

Принципы поиска решений:

- анализ поставленной задачи с точки зрения ее своевременности и общественной потребности в ней. Раскрытие внутренних противоречий в процессах, обусловивших или обуславливающих постановку задачи;

- проверка правомерности постановки задачи с точки зрения общих законов природы;

- проверка осуществимости решения задачи на современном уровне науки, техники и производства;

- разработка методов решения задачи, выбор головного эксперимента и анализ полученных результатов головного эксперимента;

- нахождение взаимосвязи решений с поставленной задачей.

*Системный подход* — это направление методологии научного познания и социальной практики, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем. Системный подход ориентирует исследователей на раскрытие целостности объекта, на выявление многообразных связей в нем и сведение их в единую теоретическую картину.

При системном подходе система представляется двумя составляющими:

- внешнее окружение, включающее в себя вход и выход системы, связь с внешней средой и обратную связь;

- внутренняя структура, обеспечивающая переработку входа системы и ее выход и достижение целей системы.

К системному подходу можно также отнести и комплексный подход.

Системный подход неразрывно связан с материалистической диалектикой, является конкретизацией ее основных параметров.

Анализ и синтез являются фундаментальными понятиями в философии и в системном подходе. Если анализ – процесс мысленного расчленения (декомпозиции) или реального разбиения объекта на элементы с учетом имеющихся между ними связей, то синтез – процесс воссоединения элементов в одно целое.

Анализ и синтез системы во взаимосвязи выявляют, из каких частей состоит целостная система и как они (части) взаимодействуют друг с другом. Таким образом раскрываются принципы функционально-структурной организации системы. Не следует полностью отождествлять диалектику и системный подход. В отличие от диалектики системный подход представ-

ляет собой специализированную методологию, хотя и имеющую общенаучное значение.

Диалектический материализм – это целостное мировоззрение, научная теория и методология, а системный подход – только одна из его граней. Системный подход является конкретизацией диалектики на современном этапе развития.

Диалектика представляет собой всеобщую теорию развития. Действие основных законов диалектики проявляется также в развитии систем. Рассмотрим основные законы диалектики в приложении к закономерности развития техники.

*Закон единства и борьбы противоположностей.* Причину всякого процесса составляет взаимодействие двух противоположных начал, способствующих и препятствующих развитию. Противоречивую роль информационных процессов раскрывает закон необходимого разнообразия Эшби. Только постоянно изменяясь под воздействием окружающей среды, только отражая ее изменения, система может остаться собой, сохраняя свое качество.

Прогрессивное развитие всегда связано с ограничением разнообразия. Из множества возможных сценариев эволюции на практике реализуется только один. Но этот процесс сопровождается увеличением сложности, внутреннего разнообразия прогрессирующих систем. Итак, любой процесс движения информации связан с уничтожением, ограничением одного вида разнообразия и одновременным увеличением другого его вида.

*Закон перехода количественных изменений в качественные.* В процессе эволюции любой системы происходят накопление количественных изменений и переход их в качественные изменения.

*Закон отрицания отрицания.* Этот закон действует в сфере восходящего развития, при которой происходит увеличение параметров системы. В общем случае закон утверждает, что на более высокой ступени развития повторяются некоторые черты, свойственные исходной ступени. Содержание, достигаемое системой на последовательных ступенях развития, изменяется за счет поочередных отрицаний отдельных его частей. Второе отрицание, снимающее первое, ведет к частичному воспроизведению на качественно новом уровне информации, обогащенной опытом двух ступеней развития.

### 1.3. Свойства систем

Система состоит из исходных единиц – компонентов. В качестве компонентов системы (в широком смысле) могут рассматриваться объекты, свойства, связи, отношения, состояния, фазы функционирования, стадии развития. Объекты, представляющие собой единицы, из которых состоит система, могут быть материальными и нематериальными.

Свойства системы, специфичные для данного класса объектов, могут стать компонентами системного анализа. Свойства могут быть как изменяющимися, так и неизменными при данных условиях существования системы: внутренних (собственных) и внешних. Собственные свойства зависят только от связей (взаимодействий) внутри системы, это свойства системы «самой по себе». Внешние свойства актуально существуют лишь тогда, когда имеются связи, взаимодействия с внешними объектами (системами).

Связи изучаемого объекта также могут быть компонентами при его системном анализе. Связи имеют вещественно-энергетический характер.

## **1.4. Методы поиска решений**

### ***Логический подход***

Логика (греч. *logike*) – наука о ходе и способах доказательств и опровержений. В основе формально-логических методов принятия решений лежит использование логических законов выводного значения, полученного логически из предшествующих знаний без непосредственного отношения к опыту. Основное требование логики - обязательность последовательного непротиворечивого, обоснованного мышления. Нельзя считать истинными знания, содержащие логические противоречия. Логика помогает интенсифицировать любую умственную деятельность. Но «не орудуйте логикой, как дубинкой». Как часто нас подводит так называемый «здравый смысл», иначе шаблонное логическое мышление.

Исключительную эффективность нешаблонного мышления мы можем видеть в экстремальных и, казалось бы, тупиковых ситуациях, но и здесь нельзя отвергать логику. Различие между шаблонным и нешаблонным мышлением состоит в том, что при шаблонном мышлении логика управляет разумом, тогда как при нешаблонном она его обслуживает. Шаблонное мышление называют «психологической инерцией», под которой подразумевается бессознательное предрасположение к какому-нибудь конкретному методу или образу мышления, которые обычно характеризуют выражением «идти по проторенной дорожке». Психологическая инерция - это следствие существующих методов обучения, по которым изучают не способы добычи знаний, а готовые конкретные рецепты.

### ***Математический подход к принятию решений***

Лишь несколько десятилетий назад искусство принятия решений, базировавшееся на опыте, интуиции и здравом смысле, стало превращаться в точную науку. Сейчас проблемы принятия решений изучаются специалистами в области системного анализа, исследования операций и управления, используются многомерная теория полезности как самостоятельная

научная дисциплина, методы многокритериальных задач принятия решений, методы оптимизации и прогнозирования. Но и при математических подходах основная часть алгоритма системного подхода к принятию решения остается неформализованной, выполняется человеком при постановке задач и обобщении результатов математического анализа.

Лицо, принимающее решение (ЛПР), должно определить критерии оценки (целевую функцию) возможных решений проблемы. Этими критериями могут быть, например, расходы, прибыль, повышение производительности, предотвращение аварий.

Успешность решения проблемы зависит от того, насколько успешно разработаны возможные альтернативы. Желательно не упустить ни одной сколько-нибудь значащей альтернативы, включая альтернативу ничего не предпринимать. Для анализа и сравнения альтернатив, выбора наилучшей альтернативы часто применяются математические методы, включая методы оптимизации и прогнозирования.

Осуществление выбранной альтернативы означает просто осуществление действий, обозначенных в альтернативе. Принятие решения требует проверки результатов его осуществления и, при необходимости, устранения ошибки. На принятие решения всегда накладываются объективные ограничения, вызываемые расходами, человеческими возможностями, сроками, технологией и наличием информации.

Причиной неудач технических решений является субоптимизация, когда принимаются оптимальные решения для одной составной части системы, приводящие к неоптимальным решениям всей системы. Выбор техники анализа определяется условиями, в которых принимаются решения. Эти условия классифицируются по степени точности и уверенности. Имеются три основных категории условий: уверенность, риск и неопределенность.

В условиях уверенности выбирается альтернатива, которая дает наибольшее (наименьшее) значение основного критерия (см. раздел 5). Фактор риска находится между двумя полярными случаями — уверенностью и неопределенностью.

### ***Методы интенсификации мыслительного процесса***

К методам интенсификации мыслительного процесса при принятии решений относятся мозговая атака, деловые игры, конференции идей, методы экспертных оценок и другие методы.

При *мозговой атаке* процесс выдвижения идей происходит лавинообразно. Выдвинутая идея порождает либо творческую, либо критическую реакцию, что стимулирует появление новых идей. Групповое мышление производит на 70 % больше ценных новых идей, чем сумма индивидуальных мышлений. Существует несколько модификаций мозговой атаки: индивидуальная, массовая, письменная, двойная и обратная, а также синектика.



В основу синектики (совмещение разнородных элементов) положена мозговая атака, отличающаяся тем, что здесь используются постоянные группы, составленные из специалистов разных профессий. Рекомендуются, чтобы члены синектической группы (кроме руководителя) перед началом работы не знали сути рассматриваемой проблемы, что позволяет им абстрагироваться от привычного стереотипа мышления, успешнее преодолеть психологическую инерцию мышления. Ибо умственная деятельность человека более продуктивна в новой, незнакомой ему обстановке.

*Конференция идей* – одна из разновидностей коллективного творчества. От мозговой атаки она отличается прежде всего темпом работы и проводится в виде совещания по выдвижению идеи с допущением доброжелательной критики в форме реплик, комментариев и т.п. Считается, что критика может даже повысить ценность выдвинутых идей. Все выдвинутые идеи фиксируются в протоколе без указания авторов. В этом заключается тот существенный смысл, что результаты конференции идей являются как бы коллективным трудом.

*Деловые игры* представляют собой метод имитации принятия управленческих и других решений в различных ситуациях (производственных и непроизводственных) путем игры по заданным правилам группы людей или человека с ЭВМ. Проигрывается множество ситуаций как бы произвольных. В действительности же, в силу специфических дискуссионных приемов, плодотворность которых отмечали еще древние («истина рождается в споре»), возникает ряд альтернативных решений.

Сущность *экспертных методов* состоит в использовании опыта работы, эрудиции и интуиции высококвалифицированных специалистов, способных находить решения в условиях трудно формализуемых ситуаций и недостаточной информации. Методы экспертных оценок позволяют квалифицировать (количественно выразить) качественные характеристики изучаемого объекта. При этом реализуются возможности системного подхода, поскольку интегрально используется информация, которой владеет группа экспертов.

При системном подходе принятия решений нельзя исключить эвристические методы (догадки, озарения и т.п.), над проблемой можно работать годы, но идея может возникнуть мгновенно, как результат озарения.

У многих зрелых инженеров, ученых, педагогов на основе большого личного опыта вырабатывается «своя система» принятия решений. Но овладев системным подходом к принятию решений, можно быстрее постигнуть и выбрать для своей деятельности оптимальные методы принятия решений.

Системный подход к принятию решений состоит в следующем:

– принятие решений является не начальным, а завершающим этапом творческого цикла, который начинается с выделения системы, определяющей проблемную ситуацию, затем продолжается в выявлении тех закономерностей, по которым развивается и функционирует данная система, и

только потом наступает этап выбора метода принятия решения;

- возможность выбора методов принятия решений обеспечивается использованием функционально-структурного подхода;

- процесс принятия решения нельзя отделить от «человеческого фактора», от психологических и социально-экономических факторов, от особенностей личности, в частности смелости и умения ввести (включить) в решение некоторую степень риска.

Выработка верных решений – это не только наука, а также интуиция, опыт, чутье, все то, что называется словом «искусство». В их единстве рождается высшая мудрость.

Представляя процесс инженерного творчества как связь трех неразрывных составляющих (системный подход – законы развития – принятие решений), раскроем смысл, вкладываемый в концепцию современного взгляда на научную, инженерную и учебную деятельности:

- во-первых, мировоззренческая позиция, основанная на диалектическом материализме. Находит эта позиция свое отражение в системном (функционально-структурном) подходе;

- во-вторых, применяя системный подход к решению задач технических систем, мы базируемся на законах и закономерностях их развития;

- в третьих, результатом системного подхода к задачам развития техники является принятие решения, которое выражает процесс вскрытия и преодоления противоречий. Здесь весьма важно владеть разнообразными методами активизации творческого мышления и использовать накопленные в различных отраслях техники опыт, банки данных.

Таким образом, ученый, инженер, педагог на основе системного подхода, опираясь на законы развития техники, может принимать эффективные решения в своей научной, инженерной и учебной деятельности.

В заключение отметим, что ознакомление аспирантов и студентов с основами системного анализа и системного подхода при решении технических, управленческих и научных проблем направлено на повышение уровня их инженерной подготовки.

## **Контрольные вопросы**

1. Сущность системного анализа.
2. Свойства систем.
3. Факторы и принципы принятия решений.
4. Алгоритм принятия решений.
5. Методологические основы теории принятия решений.
6. Системный подход, философская сущность системного подхода.
7. Методы поиска решений: логика, математический подход.
8. Методы интенсификации мыслительного процесса.

## **2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

Известно, что разработка конструкции машины – весьма трудоемкий и ответственный процесс. На разработку конструкции требуется затрат в 100 раз больше, чем на прикладные исследования. Для нахождения одного удачного технического решения необходимо проработать более полусотни технических идей. Время, затраченное на разработку конструкторской документации, соизмеримо со временем, затрачиваемым на изготовление машины. Сокращение времени и трудозатрат на проектирование машины, а также повышение качественных показателей машины обеспечиваются, в частности, применением методов прогнозирования и оптимизации технических решений.

В разделе рассмотрен системный подход к проектированию и эксплуатации машин и оборудования, заключающийся в обосновании закономерностей, основных принципов и тенденций развития, в учете качественных и экономических показателей, рациональной организации технической и технологической эксплуатации.

### **2.1. Понятие о технике и технической системе**

Термин «техника» неоднозначен. Он восходит к греческому *techne*, происходящему от индоевропейского корня «*tekn*», означающего искусство, ремесло, мастерство, например в деревообработке или плотницком деле. В широком смысле термин «техника» имеет два аспекта:

1) орудия труда: инструменты, машины и другие артефакты (т.е. искусственно созданные), с помощью которых человек преобразовывает действительность в соответствии со своими потребностями;

2) совокупность навыков, умений, приемов, методов, операций, необходимых для приведения в действие орудий труда или для осуществления определенных целей и конкретных задач, в том числе для создания самих орудий. Этот аспект часто называется технологией.

В современном понимании техника – это диалектически развивающаяся материальная совокупность средств труда, предметов труда и самого труда. В понятие техники входят технические устройства (от простейших орудий до самых сложных технических систем), различные виды технической деятельности по созданию этих устройств (от научно-технических исследований и проектирования до их изготовления и эксплуатации) и технических знаний (от специализированных рецептурно-технических до теоретических научно-технических и системотехнических знаний).

Закономерны следующие приоритеты развития техники и экономики: образование → наука → инвестиции → техника (экономика). Примеры

развития техники в ряде стран (Китай, Япония, Германия, Финляндия, Советский Союз) в предвоенные пятилетки и в послевоенное восстановление техники и экономики подтверждают очевидность приведенных приоритетов. Машины и оборудование составляют основу техники, поэтому развитие техники может происходить только на основе совершенствования существующих и создания новых видов машин и оборудования.

Заметим, что *машиной* называется подвижная механическая система, предназначенная для преобразования энергии или работы. Характерный признак машины – наличие двигателя и рабочего орудия с передаточными устройствами между ними. *Оборудование* – это совокупность машин, устройств, приборов, приспособлений, необходимых для производства. Совокупность машин, приборов, системы управления этой совокупностью и обеспечения работы называется *технической системой*. Например, бумагоделательная машина, состоящая из множества агрегатов и систем (массоподводящая, вакуумная, вентиляционная, пароконденсатная и др.), является сложной технической системой. В дальнейшем для краткости машины, оборудование, технические системы будем называть машинами.

С развитием техники повышается технический уровень машин, усложняются выполняемые ими функции и совершенствуются принципы их конструирования. Создание новых образцов машин предопределяется необходимостью повышения производительности труда, реализации новых технологических процессов и практических воплощений научных открытий. Между машинами, используемыми в производстве, и технологиями производства существует теснейшая связь. Развитие технологии производства вызывает необходимость создания новых машин.

Любая машина с течением времени стареет и заменяется новой, более совершенной. Различают две формы морального износа машин. Первая форма обуславливается удешевлением производства машин. Действие этой формы износа проявляется в том, что у потребителя уменьшается сравнительная фондовая отдача, т.е. величина отношения стоимости произведенных работ к стоимости самой машины. Вторая форма морального износа машины связана с появлением другой, заменяющей ее машины с более высокими техническими показателями. Это, разумеется, не означает, что с появлением новой машины старая всегда обесценивается до такой степени, что ее следует выбросить в металлолом. Однако экономически целесообразный срок службы машины должен определяться физическим износом и моральным старением.

С точки зрения морального износа машина имеет определенные «циклы жизни» в сферах производства и эксплуатации. Типичный «цикл жизни» в сфере производства представлен на рис. 2.1. Из рисунка видно, что с появлением новой конкурентоспособной машины сбыт (кривая 1) быстро увеличивается, достигает максимума и по мере насыщения потребительского рынка сокращается. Аналогично изменяется прибыль (кри-

вая 2) предприятия-изготовителя. Максимумы кривых сбыта и прибыли, как правило, не совпадают во времени вследствие инерции производства.

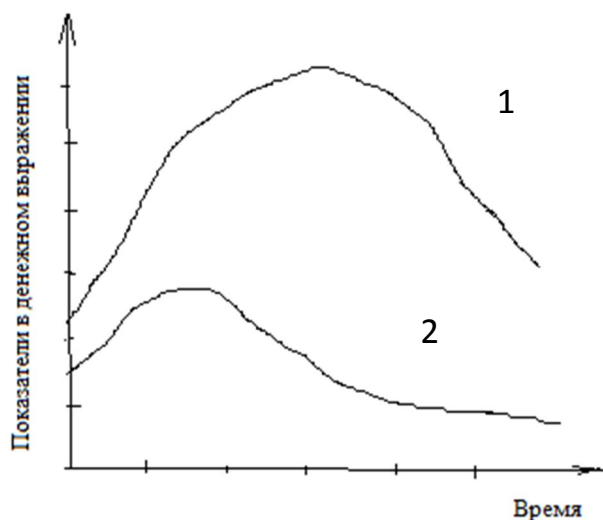


Рис. 2.1. «Цикл жизни» машины в сфере воспроизводства

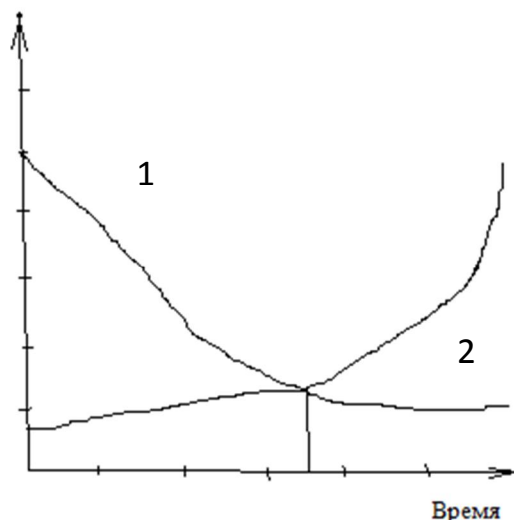


Рис. 2.2. «Цикл жизни» машины в сфере эксплуатации

В сфере эксплуатации (рис. 2.2) типичный «цикл жизни» машины определяется разностью между величиной прибыли (кривая 1), образующейся у потребителя, и эксплуатационными затратами (кривая 2). Как видно из графика, с течением времени эта разность убывает и с критического момента  $t_{кр}$  эксплуатация машины становится убыточной, необходима замена устаревшей машины новой.

## 2.2. Фазы и закономерности развития, классификация машин

Различают следующие фазы «жизни» машины: проектирование, изготовление и сборка, монтаж, доводка, эксплуатация, модернизация, списание и демонтаж. Процесс проектирования машины состоит из следующих этапов:

- обоснование необходимости создания новой машины;
- прогнозирование развития параметров машины;
- научно-технические исследования;
- разработка конструкторской документации;
- разработка технической документации;
- изготовление, испытание и доводка опытных образцов.

Обоснование и анализ необходимости создания машины проводятся на основании методов научного прогнозирования технических проблем и параметров машины. Под параметрами машин понимаются их характеристики, определяющие производительность, например, скорость бумагоделательной машины и ширина бумажного полотна, скорость и грузоподъемность грузового автомобиля.

Прогнозы разрабатывают на период, в течение которого принимаемое решение будет иметь эффективное действие. При этом прогнозирование научно-технических проблем по созданию машин должно увязываться с общим прогнозом, характеризующим развитие техники, экономики, промышленности.

На этапе научных исследований в одних случаях ведется поиск рационального принципа действия машины, в других – поиск направления улучшения рабочих характеристик, в третьих – изучение возможности использования в конструкции будущей машины изделий или материалов, выпускаемых промышленностью, в четвертых – проверяется пригодность тех или иных изобретений для данной конструкции и т.д.

Материалы первых двух этапов процесса создания машины оформляют в виде технического предложения на разработку конструкторской документации.

В отличие от проектирования, исследования и изобретательства под конструированием понимается разработка конструкторской документации, объем и качество которой позволяют изготовить машину с соблюдением всех требований машиностроительных технологий.

Для прогнозирования необходимо знать исторические законы развития техники и факторы, определяющие это развитие. Факторы, определяющие развитие техники, подразделяются на внешние и внутренние (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Классификация факторов, определяющих развитие техники

*Внешние факторы* выявляют необходимость развития машины, обуславливают предпосылки и условия, темпы развития машины. Они подразделяются на потребности, возможности и ограничения.

Потребности подразделяются на потребности общества в целом, потребности конкретной сферы использования машины, производственного процесса, в котором применяется машина. Потребности общества выражаются в том, что машина должна обеспечивать повышение производительности труда, экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов. Потребности производственного процесса – это потребности реализации тех или иных рациональных технологических процессов.

Другая группа внешних факторов – это научно-технические, производственные и экономические возможности общества реализовать те направления развития машин, которые определены потребностями. Научно-технические возможности определяются уровнем науки, техники, технологии, достигнутым к тому моменту, когда будет необходима реализация соответствующих направлений развития машины.

Темпы развития техники во многом определяются уровнем развития науки. Сейчас наука стала ведущим звеном в системе «наука – техника – производство». Значительно сократился период времени от открытия (идеи, формулирования нового технического принципа) до его практической реализации в соответствующем типе машин. Например, идея двигателя внутреннего сгорания была предложена Ф. Лебоном в 1801 году, а первый двигатель внутреннего сгорания, сконструированный Н. Отто и получивший практическое применение, появился только в 1878 году, т.е. лаг (разрыв во времени) составил почти 80 лет. В настоящее же время для машинной техники этот лаг составляет 10 - 15 лет и меньше.

В любом случае для практической реализации идеи должно быть научное обоснование возможностей её реализации. Производственные возможности характеризуются соответствием технического уровня предприятия (или предприятий), уровня квалификации его работников и уровня производственной мощности требованиям изготовления машины.

Экономические возможности - это возможности обеспечения необходимыми ресурсами (материальными, трудовыми, финансовыми) всех стадий реализации выбранного направления развития машины: от научных исследований до серийного производства.

Ограничения - это социальные и экологические требования, исключающие или сводящие к минимуму вредное воздействие машины на человека и окружающую среду в процессе её производства и применения.

Внешние факторы могут ускорять или замедлять развитие техники, изменять тенденции её развития.

На темпы развития машины оказывают влияние и такие факторы, как длительность периодов научно-исследовательских и опытно-конструкторских

работ, подготовки производства, предшествующих промышленному освоению машины и внедрению её в сферу применения.

*Внутренние факторы* присущи самой машине. Важным фактором являются естественные законы, на которых базируется технический принцип. Так, повышение коэффициента полезного действия (КПД) поршневых паровых двигателей ограничилось практически 14% в силу действия законов термодинамики, и никакие технические совершенствования этих двигателей объективно не позволяли преодолеть этот предел. И только переход на новый технический принцип работы двигателя позволил повысить его КПД.

Подобно этому законы прочности не позволяют беспредельно снижать массу конструкций без ущерба для её надёжности и работоспособности. Законы механики предъявляют соответствующие требования к выбору конструктивных форм элементов машины и их соединению, выбору типов и параметров её двигательной установки, передаточного механизма и исполнительного (рабочего) органа.

Другим важным внутренним фактором является длительность жизненного цикла технического принципа, на котором базируется машина, и степень использования его потенциальных возможностей на момент прогнозирования. В начальной стадии освоения технического принципа развитие машины идёт ускоренными темпами, но затем темпы развития замедляются и, наконец, развитие прекращается: технический принцип исчерпал себя.

Третьим фактором, определяющим темпы и тенденции развития машин особенно на ранних стадиях, является соответствие используемой конструктивной формы содержанию технического принципа. Существует определённая преемственность формы машин одного функционального назначения, но основанных на разных технических принципах. Так, форма двигателя внутреннего сгорания подобна форме поршневого парового двигателя, а водяное колесо дало форму паровой и газовой турбинам. Если форма соответствует новому принципу, это способствует ускорению темпа развития машин, если нет, то темп развития замедляется.

Темпы и тенденции развития машин определяются также взаимным влиянием машин различных типов. Темпы их развития могут замедляться, как, например, в случае с паровой турбиной при конкуренции с двигателем внутреннего сгорания, или ускоряться за счёт использования принципиальных решений элементов одних машин в конструкции других, например применение принципа коробки передач токарного станка в трансмиссии автомобиля.

Внутренние факторы отражают внутренние технические противоречия, разрешение которых является движущей силой развития видов и типов машин. В этом проявляется действие закона единства и борьбы



противоположностей, который определяет внутреннюю логику развития машины. Можно выделить принципиальные и конструктивные противоречия в развитии техники.

Принципиальные противоречия можно охарактеризовать как несоответствие между используемым в машине техническим принципом и требуемыми функциональными свойствами машины. Разрешение этого противоречия означает смену технического принципа.

## ***Классификационная система машин***

Классификационная система основана на общности функционально-конструктивных признаков каждой группы машин и включает следующие уровни классификации: класс, род, вид, разновидность, тип, типоразмер, модель. Первые четыре подразделения характеризуют функциональные особенности техники, три последних – её конструктивные особенности.

Класс объединяет всю совокупность техники, предназначенной преимущественно для данной сферы общественного производства (например, машиностроительная, транспортная, строительная техника, химическое и нефтяное оборудование).

Род объединяет совокупность машин данного класса, предназначенных для выполнения данного вида работ (система средств механизации работ данного вида, например, металлообрабатывающие машины, машины наземного транспорта, бумагоделательное оборудование и т.п.).

Вид объединяет совокупность машин данного рода, предназначенных для выполнения соответствующего технологического процесса (система средств механизации технологического процесса при выполнении работ данного вида, например, металлорежущие станки, автомобили и т.п.).

Разновидность объединяет совокупность машин данного вида, предназначенных для выполнения одной или нескольких связанных операций технологического процесса (например, станки для обработки точением, грузовые автомобили, экскаваторы, рубительные машины и т.п.).

Тип объединяет совокупность конструктивно подобных машин.

Типоразмер – это конструкция в составе данного типа, характеризующегося определёнными значениями классификационных параметров (например, автомобиль – самосвал соответствующего конструктивного типа грузоподъёмностью 8 тонн, экскаватор соответствующего типа 4-й размерной группы с основным ковшом вместимостью 0,65 м<sup>3</sup>).

Модель – конкретное конструктивное исполнение машины данного типоразмера, характеризующееся конкретным конструктивным и параметрическим её описанием. Номер модели (марка) фиксирует отличие данной модели от других моделей того же типоразмера (например, экскаватор ЭО-4121А, рубительные машины МРН-300).

Примеры классификации машин приведены в таблице.

### Классификационная схема машин

Уровень классификации	Примеры классификационных групп		
Класс	Машиностроительная техника	Транспортные машины	Оборудование химическое и нефтяное
Род	Металлообрабатывающие машины	Машины наземного транспорта	Бумагоделательное оборудование
Вид	Металлорежущие станки	Автомобили	Древесно-подготовительное оборудование
Разновидность	Станки для обработки точением	Грузовые автомобили	Рубительные машины
Тип	Токарно-винторезные станки	Самосвалы с дизельным двигателем, механической трансмиссией	Дисковые рубительные машины
Типо-размер	Токарно-винторезный станок с наибольшим диаметром обрабатываемых изделий 400 мм и расстоянием между центрами до 1400 мм	Самосвал грузоподъемностью 8000 кг, колёсная формула 4x2	Дисковые рубительные машины многоножевые, большого диаметра
Модель	ИК62	МАЗ-5549	МРН-300

Для решения функциональной задачи одинаково важны геометрические формы (конструкция), материалы и технология, взаимосвязь которых представлена на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Взаимосвязь конструкции, материалов и технологии

## 2.3. Основные принципы и тенденции при конструировании машин

### ***Последовательность и итерационность разработки конструкторской документации. Функциональная целесообразность и конструктивная преемственность***

*Последовательность* – очерёдность выполнения этапов и стадий.

*Итерационность* – корректировка решений предыдущих этапов.

*Функция* – основа задачи конструирования. *Цель конструирования* – наиболее полное решение поставленной функциональной задачи.

Воспроизведение функций машины представляется в виде трёх равноценных составляющих:

- 1) механическая система, воспроизводящая заданные движения или обеспечивающая заданное состояние;
- 2) система измерения или восприятия характеристик процесса;
- 3) система управления процессом.

*Функциональная целесообразность* – принцип соответствия выбранного решения целесообразности поставленной задачи.

Принцип функциональной целесообразности выражается в показателях функционирования (назначения): производительности, материалоёмкости, энергоёмкости и др. Под производительностью понимается количество производимой продукции в единицу времени, под материалоёмкостью – отношение массы машины к единице вырабатываемой продукции, под энергоёмкостью – количество энергии, затрачиваемой на выпуск единицы продукции.

Заметим, что все, что производится, называется продукцией. Понятие «продукция» охватывает изделия и продукты. Изделие в процессе использования заметно не теряет своей массы. К изделиям относятся машины и оборудование. Продукты (пищевые продукты, горюче-смазочные материалы и др.) при использовании теряют свою массу.

Конструктивная преемственность – использование в конструкции технических решений, применяемых в прототипах и в других машинах, использование банков конструкций и технических решений, материалов и технологий (рис. 2.5).

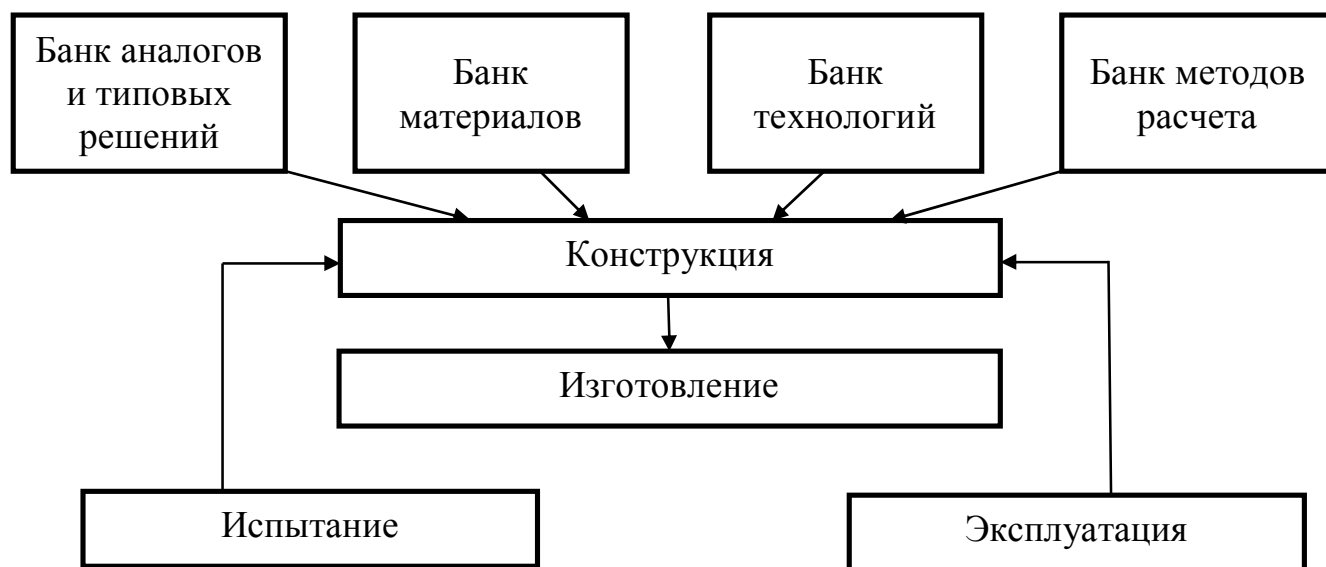


Рис. 2.5. Схема конструктивной преемственности

## ***Учёт тенденций развития машин при конструировании***

Перечисленные ниже тенденции не догма. Использование любой тенденции надо проверять на соответствие принципу функциональной целесообразности. Заметно выражены следующие тенденции развития машин:

- 1) увеличение основных параметров машин;
- 2) замена механизмов с возвратно-поступательными или возвратно-вращательными движениями механизмами, все звенья которых совершают вращательные движения, например, поршневых компрессоров - турбокомпрессорами, лесопильных рам - круглопильными станками, поршневых двигателей - турбодвигателями и т.д.;
- 3) применение многодвигательных приводов взамен однодвигательных; многообразие приводов: электрических, гидравлических, пневматических и др.;
- 4) применение низших кинематических пар взамен высших, применение передаточных устройств с гибкими звеньями;
- 5) применение подшипников жидкостного трения взамен подшипников качения;
- 6) применение упругих шарниров и упругих направляющих взамен традиционных кинематических пар в условиях ограниченных перемещений соответственно угловых и линейных;
- 7) применение пластмасс и композитных материалов в «не силовых» элементах конструкций;

- 8) предпочтение штампованных и штампованно-сварных деталей литым;
- 9) применение неразъёмных соединений взамен разъёмных, в частности, пластических соединений взамен болтовых;
- 10) уплотнение неподвижных стыков специальными герметиками, а не прокладками;
- 11) применение быстроходных приводов взамен тихоходных. Замена двигателей постоянного тока двигателями асинхронными с частотным регулированием;
- 12) предпочтение статически определимых и достаточно деформативных систем звеньев, опор и подвесок агрегатов, обеспечивающих их самоустановку, статически неопределимым системам, требующим регулировки или подгонки взаимного расположения звеньев;
- 13) предпочтение систем с короткой размерной цепочкой системам с длинной размерной цепочкой, что повышает точность системы;
- 14) применение коротких замыканий силовых линий в машинах взамен длинных силовых линий;
- 15) резервирование машин в поточных линиях;
- 16) применение пневматических и гидропневматических конструкций;
- 17) комплексная механизация и автоматизация всех технологических операций при изготовлении изделий, роботизация производства;
- 18) автоматизация управления машиной;
- 19) применение встроенных систем диагностирования;
- 20) применение централизованной смазки и безызносных кинематических пар на основе избирательного переноса;
- 21) поверхностное упрочнение деталей в элементах кинематических пар, применение противоизносных покрытий (хромирование, керамические покрытия и т.д.).

***Автоматизация конструкторских работ,  
оптимизационное и ресурсное проектирование,  
математическое моделирование***

Автоматизация конструкторских работ заключается в применении САПР и других программных средств. Оптимизационное проектирование предусматривает выбор наилучших из всех возможных решений. Ресурсное проектирование заключается в определении ресурса всех составных частей машины в соответствии с принятым нормативным ресурсом проектируемой машины. Ресурсное проектирование по трудоёмкости соизмеримо с разработкой конструкторской документации и в настоящее время находится в стадии зарождения. При оптимизационном и ресурсном проектировании используется математическое моделирование.

### **Типизация, комплексность**

Типизация заключается в том, что для машин массового и серийного производства, а в отдельных случаях и индивидуального производства, разрабатываются типажные машины с конкретными параметрами и размерами, например грузоподъемностью автомобилей, обрезной шириной бумаги на бумагоделательных машинах.

Под типажом машин понимается технически и экономически обоснованная совокупность типов и типоразмеров машин, обладающих общностью назначения. В основу типажных машин закладывается базовая модель, под которой понимается конструктивное исполнение машины, являющейся основой для ряда машин подобного типа или его модификаций.

Комплексность заключается в разработке комплекса машин для выполнения всех технологических операций, согласованных по производительности и другим признакам. Комплексность есть основа образования поточных линий, в том числе автоматизированных.

### **Принципы иерархичности и декомпозиции конструкций**

*Принцип иерархичности* конструкции заключается в разбивке конструкции машины на сборочные единицы (узлы), состоящие из сборочных единиц первого уровня и деталей, на сборочные единицы второго уровня и последующих уровней на детали, на системы контроля и управления и на системы, поддерживающие работу технической системы.

*Принцип декомпозиции* (блочности, модульный принцип) позволяет осуществлять независимую параллельную сборку отдельных сборочных единиц, их обкатку и проверку, подачу на общую сборку в законченном виде. При эксплуатации машин этот принцип позволяет реализовать блочный метод ремонта машин. Циклы сборки и ремонта уменьшаются.

Для обеспечения модульного принципа машина должна иметь четкое деление на сборочные единицы, высокий коэффициент сборности, который равен

$$K_{сб} = \frac{Q_{сб}}{Q_0}, \quad (2.1)$$

где  $Q_{сб}$  – количество, масса или стоимость специфицируемых составных частей изделия, входящих в сборочные единицы;

$Q_0$  – общее количество, масса или стоимость всех составных частей машины.

## **Принцип унификации и стандартизации**

Унификация и стандартизация заключаются в применении в машине унифицированных или (и) стандартных составных частей.

К стандартным относятся изделия, основные параметры которых установлены государственными, отраслевыми стандартами, а также нормами машиностроения. К унифицированным относятся изделия, изготовленные по стандартам предприятия, или оригинальные изделия, используемые не менее чем в двух типоразмерах или видах изделия, а также серийно изготавливаемые покупные изделия.

Унификация и стандартизация устраняют излишнее многообразие изделий, удешевляют изготовление машины. Изготовление оригинальной детали обходится в несколько раз дороже стандартной или унифицированной. Поэтому, где возможно, нужно применять стандартные или унифицированные составные части машины.

Уровень стандартизации и унификации оценивается коэффициентами применимости стандартных  $K_{ст}$  или унифицированных  $K_y$  составных частей, определяемыми по формулам

$$K_{ст} = \frac{n_{ст}}{n_{ст}+n_y+n_o}100\%, \quad K_y = \frac{n_y}{n_{ст}+n_y+n_o}100\% , \quad (2.2)$$

где  $n_{ст}$ ,  $n_y$ ,  $n_o$  – количество типоразмеров соответственно стандартных, унифицированных и оригинальных составных частей машины.

Так, уровень унификации оборудования ЦБП следующий: бумагоделательных машин – 70 %, продольно-резательных станков – 90 %, установок непрерывной варки целлюлозы – 40 %. Например, в бумагоделательной машине Б15 оригинальных сборочных единиц – 6673, оригинальных деталей – 4984, унифицированных и стандартных – соответственно 3566 и 15110.

Унификация обеспечивается следующим методами:

1) секционирование – разделение машины на одинаковые секции и образование производных машин набором унифицированных секций (например, транспортеры, насосы, фильтры и т.п.);

2) изменение линейных размеров – изменение длины, сохранение формы поперечного сечения. Например, сушильные цилиндры бумагоделательных машин с обрезной шириной бумаги 4200 и 6720 мм имеют одинаковые крышки, паровые головки и пароконденсатные системы;

3) метод базового агрегата – на базовый агрегат навешивается разное оборудование и получают машины различного назначения;

4) конвертирование – переоборудование машины для работы по противоположному назначению, например, двигателя постоянного тока –

в генератор электрического тока, турбокомпрессора – в вакуумный турбоагрегат;

5) компаундирование – параллельное соединение одинаковых агрегатов (например, сдвоенный дефибрер, горизонтальный поршневой насос);

6) модифицирование – переделка машины с целью приспособления ее к иным условиям работы, например машины для работы в обычных климатических условиях – в машину для работы в тропическом или арктическом исполнениях, или бумагоделательной машины для выработки газетной бумаги – в машину для производства санитарно-гигиенических бумаг;

7) агрегатирование – сочетание унифицированных сборочных единиц в машине (двигателей, редукторов, валов и т.п.);

8) комплексная нормализация, т.е. когда машины целиком собираются из нормализованных конструкций;

9) универсализация машин;

10) увеличение рабочих параметров машин с одновременным снижением удельной материалоемкости, повышение мощности единичных агрегатов. Под удельной материалоемкостью понимается отношение массы машины к единице выпускаемой продукции. Удельная материалоемкость характеризует рациональность конструкции, отсутствие «лишнего» металла, завышенных запасов прочности.

## **2.4. Качественные показатели машин**

Качеством продукции называется совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. Количественными характеристиками качества машин являются следующие показатели: технологичность, безопасность, надежность, эргономические, эстетические, санитарно-гигиенические, патентно-правовые, трибологические характеристики.

### ***Показатели технологичности машин***

Технологичность конструкции машины – это возможность изготовления ее деталей, сборки сборочных единиц с наименьшими трудовыми затратами при рациональном расходовании материала. Технологичность оценивается удельной трудоемкостью производства, характеризуемой отношением затрат времени в нормо-часах на изготовление машины к основному параметру, определяющему производительность машины.

Технологичность характеризуется следующими показателями.

1. Соответствие конструктивных форм детали условиям технологии их изготовления. Например, при изготовлении литых деталей необходимо предусмотреть литейные уклоны, для сварных деталей – удобство и даже возможность выполнения сварных работ, при механической обработке –



создание удобных баз для установки и мест крепления изделия на станке, обеспечение доступа к обрабатываемым поверхностям режущего и измерительного инструментов, уменьшение размеров обрабатываемой поверхности, создание форм, удобных для обработки поверхностей, минимизация количества установок при обработке детали.

2. Экономичность расходования материалов, особенно легированных сталей, цветных металлов, достигаемая выбором сечений, применением тонкостенных конструкций, окон и выемок в ненагруженных частях детали, введением ребер жесткости. Иначе рациональность конструкции обеспечивается равнопрочностью всех конструктивных элементов детали. Каждая часть детали должна работать. Следует, где возможно, применять пластмассу и композитные материалы, вместо стали – более дешевый чугун, составные сборные конструкции деталей, например, трубчатые и сплошные конструкции валов, венец червячного колеса бронзовый, а ступица – чугунная.

Степень насыщенности ( $K_p$ ) конструкции машины рациональными в техническом отношении материалами (современными тонкостенными конструкциями, гнутыми элементами, деталями, полученными прокаткой, и т. п.) определяется по формуле

$$K_p = \frac{Q_p}{Q_{\text{общ}}}, \quad (2.3)$$

где  $Q_p$  – количество или стоимость рациональных конструктивных изделий;  
 $Q_{\text{общ}}$  – общее количество конструктивных изделий или их стоимость.

3. Обоснованность применения каждого механизма, сложного устройства, сложных деталей, деталей, без которых, на первый взгляд, можно обойтись. Должна быть обоснована необходимость каждой выточки, уступа на детали и т. п. Этот показатель для опытного конструктора очевиден и приводится лишь как напоминание студентам.

4. Назначение обоснованных допусков и отклонений, зазоров и посадок в соединениях деталей исходя из технических и экономических соображений; увеличение точности изготовления деталей и повышение чистоты обработки поверхностей повышает стоимость их изготовления.

5. Технологичность сборочно-разборочных операций. Удобство сборки и регулирования обеспечивается доступностью ко всем собираемым деталям, доступностью инструмента к крепежным деталям, возможностью необходимых измерений. Для установки и выверки деталей предусматриваются окна, люки, специальные приспособления. Для удобства разборки предусматривается возможность съема деталей с учетом возможности их «прикипания» в процессе эксплуатации (подшипников, шкивов, зубчатых колес и т. п.). Для этого предусматриваются технологические отверстия, в том числе резьбовые для съема детали. Предусматриваются рациональные соединения, например посадка тяжелых деталей на конус и т. п.

Уменьшается объем пригоночных операций при сборке путем применения компенсирующих устройств (подкладок, прокладок, пружин), путем уменьшения площади поверхностей, по которым производится пригонка.

### ***Триботехнические показатели***

Приемлемые показатели достигаются обеспечением надежности смазки всех трущихся поверхностей, применением материалов в узлах трения с высокой износостойкостью, контролем смазки.

### ***Эстетические показатели***

В настоящее время при конструировании уделяется большое внимание внешнему виду изделия – технической эстетике. При конструировании машин добиваются такого внешнего оформления, которое бы производило наиболее благоприятное впечатление. Эта сложная задача решается, как правило, совместно специалистом в области художественного конструирования (дизайнером) и конструктором изделия.

Внешний вид изделия решается уже при разработке схемы общей его компоновки. На этом этапе конструирования создается композиция изделия, обеспечивается совершенство формы и соразмерность как самого изделия, так и всех его узлов. Техническая эстетика не должна вступать в противоречие с технической целесообразностью. Поэтому при оформлении внешнего вида изделия стремятся сохранить единство его структуры с назначением и конструктивной основой.

Машина должна быть красивой. Красивая машина конкурентоспособна. Замечено, что производительность труда на красивой машине выше. Главные критерии красоты машины:

- взаимосоответствие (неразрывная связь) формы, функции и содержания (внутреннего строения);
- единство и целостность композиции;
- соблюдение пропорций конструктивных элементов, использование древнего правила «золотого сечения», которое характеризуется следующими соотношениями размеров - 0,382:0,618:1,000:1,618:2,618 и т.п.;
- обеспечение масштабности;
- визуальное восприятие устойчивости, прочности, равновесия. В отличие от физических категорий характеризует чисто субъективное зрительное восприятие перечисленных категорий (например, наклон Пизанской башни);
- восприятие динамичности конструкции;
- обтекаемость, неугловатость форм;
- цветовое оформление.

Цветовой тон, контрастность, насыщенность цвета вызывают различные эмоции и оказывают разные психологические воздействия на человека:

- красный цвет - возбуждающий, горячий, энергичный, быстро утомляет зрение;

- коричневый цвет - теплый, создает мягкое спокойное настроение, выражает прочность, устойчивость, но способен располагать к мрачному настроению. Коричневый цвет с синим оттенком угнетает, настораживает, вызывает тревогу, ожидание неприятностей;

- оранжевый цвет – горячий. Он согревает, бодрит, стимулирует к активной деятельности;

- желтый цвет – теплый, веселый, располагающий к хорошему настроению, обостряет слух, успокаивает, умиротворяет человека, снимает раздражение;

- синий цвет напоминает о воде, о холоде, он свеж и прозрачен. Его воздействие уменьшает физическое напряжение, успокаивает;

- фиолетовый цвет – это цвет утомляемости и беспокойной взволнованности;

- белый – холодный, благородный;

- черный – мрачный, тяжелый, резко снижает настроение.

В восприятии человеком цвета важную роль играет сочетание цветов, цветовой контраст. Четко воспринимаемые контрастные сочетания цветов по степени убывания следующие: синий на белом, черный на желтом, желтый на белом, черный на белом, зеленый на красном, красный на желтом, оранжевый на черном и белом, красный на зеленом.

### ***Эргономические и санитарно-гигиенические показатели, показатели безопасности***

Эргономика – это наука, изучающая функциональные возможности и особенности человека, работающего с машиной. Она возникла на стыке технических наук, психологии, физиологии. Эргономические показатели включают в себя антропометрические, физиологические и психологические требования. Эргономические показатели характеризуют степень приспособленности машины к взаимодействию с человеком-оператором.

Антропометрические требования характеризуют соответствие конструктивных элементов машины размерам и форме человеческого тела, его динамическим и массовым характеристикам. В частности, антропометрическими показателями являются соответствие размерам человека размеров кабин и пультов управления, форм и размеров рукояток управления, размеров люков, дверей, площадок, хода педалей, размещения рычагов управления, параметров виброизоляции сидений и т.п.

Физиологические и, в частности, биомеханические требования определяются физиологическими свойствами человека: силовыми, скоростными возможностями человека, возможностями его органов чувств.

Психофизиологические требования определяют соответствие машины особенностям функционирования органов чувств человека (слуха, зрения, осязания). Психофизиологические требования включают в себя особенности восприятия, памяти, мышления, образования, закрепления навыков и др.

Иногда к эргономическим относят санитарно-гигиенические показатели. Но эти показатели целесообразно выделять в отдельную группу, поскольку обеспечение их изучается в другой науке – «Безопасность жизнедеятельности».

Санитарно-гигиенические показатели характеризуют соответствие машины санитарно-гигиеническим нормам и рекомендациям по температуре, шуму, вибрации, запыленности, загазованности, токсичности, радиации, влажности, инфра- и ультразвуку и др.

### ***Показатели надежности***

Показатели надежности – одна из важнейших групп показателей качества машин, характеризующих способность машины выполнять заданные функции в рассматриваемый момент времени или в пределах заданного отрезка времени, сохранять во времени эксплуатационные показатели в заданных пределах, соответствующих заданным решениям и условиям использования, ремонтов, хранения и транспортирования.

Основными показателями надежности являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, а также контролепригодность.

Безотказность – свойство машины сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов (отказов). Характеризуется вероятностью безотказной работы, наработкой на отказ, гарантийной наработкой.

Долговечность – свойство машины сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта. Характеризуется следующими категориями: ресурсом, межремонтным сроком службы, сроком службы до первого капитального ремонта и др.

Ремонтпригодность – приспособленность машины к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и ремонта. К ремонтпригодности можно отнести контролепригодность, под которой понимается приспособленность машины к контролю и диагностированию ее технического состояния при эксплуатации.

Сохраняемость – сохранение машиной эксплуатационных показателей в течение и после срока хранения и транспортирования, установленных технической документацией.

Важным показателем надежности больших технических систем и точных машин является резервирование отдельных машин и конструкций. При отказе того или иного агрегата включается в работу резервный агрегат.

### ***Патентно-правовые показатели***

Ценную основу конструкторского проекта представляет интеллектуальная собственность разработчика, предприятия, которая может продаваться и покупаться, а также вороваться. Интеллектуальная собственность – это мысли, идеи, воплощенные в проекте машины. В этой связи особое значение приобретает патентоспособность и патентная чистота, воплощенные в технических решениях при разработке проекта машины.

*Патентная чистота* предусматривает наличие в проекте только своей официально признанной интеллектуальной собственности или законно приобретенного права на использование чужой собственности путем закупки лицензий. *Закупка* лицензий ускоряет технический прогресс и повышает эффективность общественного производства в тех областях науки и техники, уровень развития которых ниже уровня, достигнутого в других странах. Во многих странах мира защищаются патентами, свидетельствами следующие виды интеллектуальной деятельности: открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, полезные модели.

Открытие – установление неизвестных ранее объективно существующих закономерностей, свойств и явлений материального мира. Оно должно быть экспериментально подтверждено и являться новым для науки во всем мире.

Изобретение – отличающееся существенной новизной решение технической задачи в любой области народного хозяйства, культуры, здравоохранения или обороны, дающее положительный эффект.

Промышленный образец – новое промышленное решение изделия, например новая модель машины, прибора, механического приспособления.

Товарный знак – оригинально оформленный отличительный знак с каким-нибудь условным изображением, помещаемый фирмой или предприятием-изготовителем на изделии для его индивидуализации, например, значок на радиаторе автомобиля.

Полезная модель – это, как правило, конструкторское решение какого-либо изделия, не обладающее существенной новизной как изобретение, но имеющее оригинальную конструкцию, схему, решение.

*Патентоспособность* характеризует наличие в проекте решений, которые могут быть признаны официально объектами интеллектуальной собственности, на которые имеются патенты на изобретения, на полезные модели.

Выявление патентоспособности и патентной чистоты осуществляется при патентной экспертизе.

Патентно-чистой разрабатываемая конструкция может быть в следующих вариантах:

1) все технические решения (общая схема, конструкции составных частей, материалы и т.д.) оговорены в патентах, срок действия которых уже истек, или являются общеизвестными и не подлежащими патентованию, – это наиболее распространенный и самый простой вариант, но он не позволяет создать конкурентоспособную машину;

2) все технические решения запатентованы разработчиком и производителем машин – это наиболее предпочтительный вариант, но требует больших интеллектуальных затрат;

3) все технические решения выполнены в соответствии с лицензиями иных патентообладателей – такой вариант сопряжен с наибольшими первоначальными затратами средств, но может сократить время, затрачиваемое на разработку проекта;

4) сочетание в разной пропорции всех трех вариантов.

Приведенные показатели качества нельзя считать исчерпывающими. При разработке конкретных конструкций могут быть и другие качественные показатели.

Повышение технического уровня, качества изготовления, а также обеспечение высоких эксплуатационных характеристик машины должны осуществляться комплексно, т.е. на соответствующих стадиях ее жизненного цикла. В самом деле, технический уровень машин формируется в основном на допроизводственной стадии, высокое качество изготовления достигается высоким технико-экономическим и организационным уровнями производства и поддерживается на стадии эксплуатации (использования) продукции. Это означает, что механизм планового повышения технико-экономических показателей разрабатываемых, выпускаемых и используемых машин должен «функционировать» на всех стадиях их жизненного цикла.

Качество машин составляет техническое ядро конкурентоспособности, которая определяется также их стоимостью и такими факторами, как специфика конкретного рынка сбыта, влияние моды и т.д. Конкурентоспособность машин зависит от перечисленных факторов: чем ниже их стоимость (цена) при одинаковом качестве и прочих равных условиях, тем выше конкурентоспособность. Совокупная оценка качества продукции неполна без учета экономических (стоимостных) оценок ее разработки, производства и использования.

### ***Экономические показатели***

К экономическим показателям разрабатываемых машин относятся производительность, энергоемкость, материалоемкость, удельные трудоза-

траты на изготовление машины, капиталоемкость, удельная стоимость машины, ремонтоемкость, или удельные затраты на поддержание оборудования в технически исправном работоспособном состоянии.

Производительность – объем вырабатываемой продукции в единицу времени в целом на машину или на одного работающего на машине. Различают конструктивную, техническую и эксплуатационную производительности машины. Под конструктивной производительностью понимают выработку в единицу времени, определяемую расчетным путем на основании конструктивных данных. Техническая производительность равна технической выработке в единицу времени при непрерывной работе в конкретных производственных условиях. Эксплуатационная производительность представляет собой выработку машины, отнесенную ко всему времени, в течение которого получена эта выработка, включая время на ремонт, осмотр, заправку, регулировку, а также время на остановки по организационно-технологическим причинам.

Энергоемкость – затраты электрической и тепловой энергии на единицу вырабатываемой продукции, расход топлива на величину пробега автомобиля и т. п.

Материалоемкость – масса машины, отнесенная к параметру, характеризующему производительность машины, или к самой производительности.

Удельная стоимость машины – стоимость, отнесенная к единице вырабатываемой продукции.

Капиталоемкость – капитальные затраты на изготовление машин, поточной линии, коммуникаций, на строительство зданий и сооружений для установки оборудования, отнесенные к единице выпускаемой продукции, например число рублей, отнесенных к 1 кг вырабатываемой бумаги.

Водопотребление – затраты свежей воды, отнесенные к единице вырабатываемой продукции.

Ремонтоемкость – годовые затраты на поддержание машин и оборудования в исправном работоспособном состоянии, отнесенные к стоимости основных фондов (в процентах).

Эффективность машины – это отношение всех затрат к единице вырабатываемой на машине продукции; под эффективностью понимают показатели качества плюс экономические показатели.

Если составляющие качества, выраженные соответственно в относительных или абсолютных величинах, представить в виде комплексного (обобщенного) показателя как числитель дроби, то стоимость (цена) продукции, формируемая на каждой стадии ее жизненного цикла, может быть отражена в знаменателе. Достижение наибольшей из всех приемлемых значений этой величины, называемой интегральным показателем качества, характеризует выбор наиболее предпочтительного (с экономической и технической точек зрения) варианта создаваемой машины.

Этот показатель чрезвычайно важен при выборе того или иного направления технического развития, создании новых машин, так как только совокупность технической и экономической оценок даёт представление о целесообразности принятого решения.

## **2.5. Системотехника при проектировании сложных технических систем**

Системотехника – это особая деятельность по созданию сложных технических систем, и в этом смысле она является прежде всего современным видом инженерной, технической деятельности, но в то же время включает в себя особую научную деятельность, поскольку в ней осуществляется также и выработка новых знаний. Таким образом, в системотехнике научное знание проходит полный цикл функционирования – от его получения до использования в инженерной практике.

Инженер-системотехник должен сочетать в себе талант ученого, конструктора и менеджера, уметь объединять специалистов различного профиля для совместной работы. Для этого ему необходимо разбираться во многих специальных вопросах. В силу сказанного перечень изучаемых в вузах США будущим системотехником дисциплин производит впечатление своим разнообразным и многоплановым содержанием: общая теория систем, практически все разделы высшей математики, линейное, нелинейное и динамическое программирование, теория регулирования, методы моделирования и оптимизации, методология проектирования систем, вычислительная техника, биологические и социально-экономические, экологические и информационно-вычислительные системы, прогнозирование, исследование операций и тому подобное.

Из этого перечня видно, насколько широка подготовка современного инженера-системотехника. Однако главное для него – научиться применять все полученные знания для решения двух основных системотехнических задач: интеграция частей сложной системы в единое целое и управление процессом создания этой системы. Поэтому в этом списке внушительное место уделяется системным и кибернетическим дисциплинам, позволяющим будущему инженеру овладеть общими методами исследования и проектирования сложных технических систем независимо от их конкретной реализации и материальной формы. Именно в этой области он является профессионалом-специалистом.

Системотехника является продуктом развития традиционной инженерной деятельности и проектирования, но качественно новым этапом, связанным с возрастанием сложности проектируемых технических систем, появлением новых прикладных дисциплин, выработкой системных принципов исследования и проектирования таких систем. Особое значение в



ней приобретает деятельность, направленная на организацию, научно-техническую координацию и руководство всеми видами системотехнической деятельности (с одной стороны, проектирование компонентов, конструирование, отладка, разработка технологии, а с другой, радиоэлектроника, химическая технология, инженерная экономика, разработка средств общения человека и машины и тому подобное), а также направленная на стыковку и интеграцию частей проектируемой системы в единое целое. Именно последнее составляет ядро системотехники и определяет ее специфику и системный характер.

## **2.6. Системный подход при организации технической эксплуатации машин и оборудования**

Важнейшим фактором (направлением), обеспечивающим успешность функционирования любой организации, предприятия или их структурных подразделений, в том числе эффективность технической эксплуатации машин и оборудования, является системный подход в организации административного управления, в организации и планировании любых работ, в частности, в организации технической эксплуатации технологического оборудования.

Под технической эксплуатацией оборудования понимается поддержание его в технически исправном работоспособном состоянии и, прежде всего, его техническое обслуживание и ремонт.

Совершенствование технической эксплуатации – проблема техническая, экономическая, а также социальная. «Вклад» затрат на техническую эксплуатацию оборудования достигает десятипроцентной доли с себестоимости продукции, что соизмеримо с относительной прибылью. Социальная проблема связана с безопасной эксплуатацией оборудования. В связи с моральным старением и физической изношенностью оборудования затраты на техническую эксплуатацию и предотвращение аварийно опасных ситуаций для обслуживающего персонала, загрязнения воздушной и водной среды возрастают.

Основная цель технической эксплуатации – обеспечение работоспособности оборудования, т.е. обеспечение способности оборудования выполнять заданные функции, соответствующие требованиям нормативно-технической документации, путем решения следующих задач:

- обеспечение технической исправности оборудования и потерь в производстве, связанных с его неисправностью и ремонтом;
- сокращение простоев оборудования и потерь в производстве, связанных с его неисправностью и ремонтом;
- снижение расходов на ремонт и техническое обслуживание.

В настоящее время существуют стратегии, формы и способы реализации технической эксплуатации оборудования, представленные на рис. 2.6, где для краткости техническая эксплуатация оборудования названа главной составляющей этой эксплуатации – ремонтом.

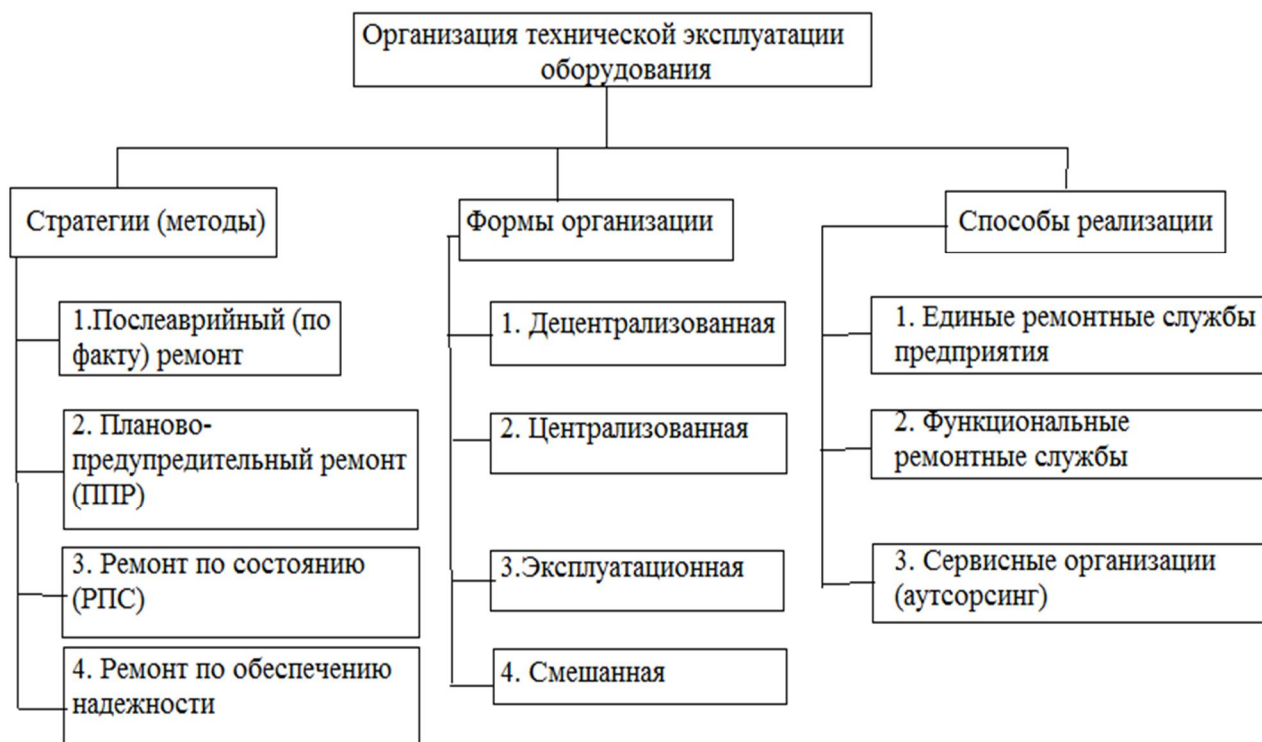


Рис. 2.6. Структура службы технической эксплуатации оборудования

При послеаварийном методе ремонтные работы ведутся после отказа оборудования. Планово-предупредительный ремонт (ППР) предусматривает проведение профилактических мероприятий по плану независимо от технического состояния оборудования с целью предотвращения отказов. Ремонт по техническому состоянию (РПС) основан на проведении профилактических мероприятий в зависимости от состояния оборудования, выявляемого посредством диагностирования.

На практике на предприятиях ЦБП и других технологических отраслях промышленности эксплуатируются непрерывно действующее оборудование в технологических потоках без резервирования, а также большое количество оборудования с резервированием. Для первой группы оборудования оптимальным является ремонт по состоянию с планированием ремонтов по системе ППР. Для сравнительно простого оборудования с большим резервированием более экономичными могут оказаться стратегия послеаварийного ремонта, стратегия смешанного ремонта, называемая стратегией технической эксплуатации оборудования по обеспечению его надежности.

Существуют четыре формы управления ремонтным производством и техническим обслуживанием: децентрализованная, централизованная, смешанная и эксплуатационная.

При децентрализованной форме весь объем ремонтных работ выполняется цеховыми ремонтными базами. При централизованной форме управления все виды ремонта и технического обслуживания технологического оборудования и оборудования вспомогательных подразделений осуществляет централизованная ремонтная служба. При смешанной форме управления текущий ремонт и техническое обслуживание осуществляются цеховыми ремонтными базами, а капитальный – ремонтно-механическим цехом. При эксплуатационной форме управления все виды ремонта и технического обслуживания оборудования выполняет эксплуатационный персонал.

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) оборудования могут осуществлять ремонтные службы предприятия в виде единой централизованной структуры или в виде функциональных структур, специализирующихся на механическом или электрическом оборудовании или на средствах управления, кроме того для ТОиР могут привлекаться специализированные сервисные организации. Организационная структура управления формировалась по функциональным направлениям, соответствующим конкретным видам оборудования (технологическое, энергетическое, оборудование КИП и А). Каждый уровень управления фактически повторяет предыдущий.

Альтернативой функционального ТОиР является централизованное ТОиР. Только при объединении служб, выполняющих ремонт механической, электрической, теплотехнической и электронной частей оборудования, можно говорить об ответственном подходе к организации ремонта и его проведению. Централизованная система позволяет реализовать все функции управления службой ремонта оборудования: организацию, планирование, координацию, учет и мотивацию.

Вывод цеховых механиков из подчинения руководителям цехов основного производства создает условия для осуществления единой технической политики в области ремонта оборудования: использование индустриальных методов ремонтных работ, специализированных ремонтных бригад, применение передовых методов организации труда и его оплаты.

При централизованном ТОиР реализуется принцип организации ремонтных подразделений в соответствии с принципами сервисного обслуживания сторонними организациями, осуществляется решение задач по управлению технологическими процессами и обеспечению работоспособности оборудования. ТОиР оборудования специализированными сервисными предприятиями (так называемый «аутсорсинг») широко практикуется за рубежом, а также восстанавливается и развивается в России, в

том числе в ЦБП. В настоящее время создаются сервисные организации трех типов: сервисные организации, включающие весь комплекс работ по ТОиР оборудования, предприятия, работающие в форме некоммерческого партнерства, а также сервисные организации, выполняющие только определенные виды работ, например по диагностике или по восстановлению отдельных составных частей оборудования.

Формы, методы и способы работ применяются в различных сочетаниях. Идеального, оптимального сочетания форм, методов и способов исполнения ТОиР, пригодного для всех предприятий вне зависимости от их величины и специфики, от особенностей используемого оборудования и организации его эксплуатации, не существует.

Для каждого предприятия или группы предприятий в зависимости от их величины, специфики технологического процесса, особенностей машин и оборудования требуется обоснование на основе системного подхода или системного анализа наилучшего сочетания форм, методов и способов их технической эксплуатации. Что касается методов ТОиР машин и оборудования ЦБП, то наиболее приемлемым является смешанный метод, с планированием по методу ППР и реализацией ремонта по состоянию.

Прогрессивные методы технической эксплуатации оборудования невозможны без применения современных методов и средств его диагностирования, преимущественно виброконтроля, вибродиагностики и вибромониторинга. При любой стратегии и форме организации технической эксплуатации оборудования важнейшее значение имеет информация о техническом состоянии (ТС) машин и оборудования. Для этой цели необходим мониторинг состояния оборудования путем его технического диагностирования. На предприятиях применяются различные формы организации диагностики оборудования: централизованная, децентрализованная, смешанная и сервисная, одноуровневая и многоуровневая.

Центральная служба диагностики организуется при техническом руководителе предприятия и осуществляет диагностирование оборудования всех производств предприятия. При централизованной службе концентрируется материальная база и квалифицированный персонал службы, но нарушается специализация специалистов по производствам.

При децентрализованной форме организации диагностики службы диагностики или отдельные специалисты диагностируют оборудование только своего цеха или производства. Обычно такая форма организации существовала на начальном этапе внедрения диагностики.

При смешанной форме первичный контроль состояния оборудования с применением простейших приборов осуществляют цеховые службы, а диагностирование в ответственных случаях по заявкам цеховых служб осуществляет централизованная служба диагностики.

При сервисной службе диагностирование осуществляют сторонние организации.

Существующие службы диагностики (как правило функциональные) осуществляют диагностирование только механического оборудования. Диагностирование электрического оборудования, КИП и автоматики осуществляют соответствующие службы технической эксплуатации оборудования.

Формы организации и технический уровень диагностики зависят от вида применяемого технологического оборудования, величины предприятия, а также от технического и экономического уровня его менеджмента. Для обоснования формы организации службы диагностики на предприятии также необходим системный подход, в частности основанный на теории рисков.

Диагностирование, основанное на теории рисков, заключается в инспектировании оборудования, имеющего дефекты и повреждения с повышенным риском аварийного отказа. По данным журнала «Техническое обслуживание и ремонт», при непрерывном производстве 90 % всех возможных отказов происходит с 10 % установленного оборудования. Поэтому при планировании работ по техническому обслуживанию оборудования следует сконцентрировать усилия на этой группе повышенного риска [1].

При системном подходе к технической эксплуатации целевой функцией является показатель эффективности ремонтной службы – аварийность, включающая следующие показатели: технические (суммарное время простоев), экономические (потери производства, стоимость ликвидации аварий и др.), комплексные (сумма потерь производства и ликвидации аварий за определенный период, отнесенная к затратам на содержание ремонтного производства). «Лучший механик (электрик) не тот, который постоянно занят, а тот, техническое состояние оборудования которого помогает ему исключить аварийную работу» [2].

Один из действенных путей совершенствования технической эксплуатации оборудования – системный подход к организации и планированию работ. Примерами системного подхода являются, например, проектный подход, система TPM (Total Productive Maintenance – всеобщее обслуживание оборудования).

Основная цель системного подхода при эксплуатации оборудования – ресурсосбережение путем решения следующих задач (проблем):

- определение параметров фактического технического состояния оборудования и прогнозирование их изменения при эксплуатации;
- сокращение вынужденных простоев оборудования,
- предотвращение выпуска бракованной продукции.

Общая схема ресурсосбережения приведена на рис. 2.7.

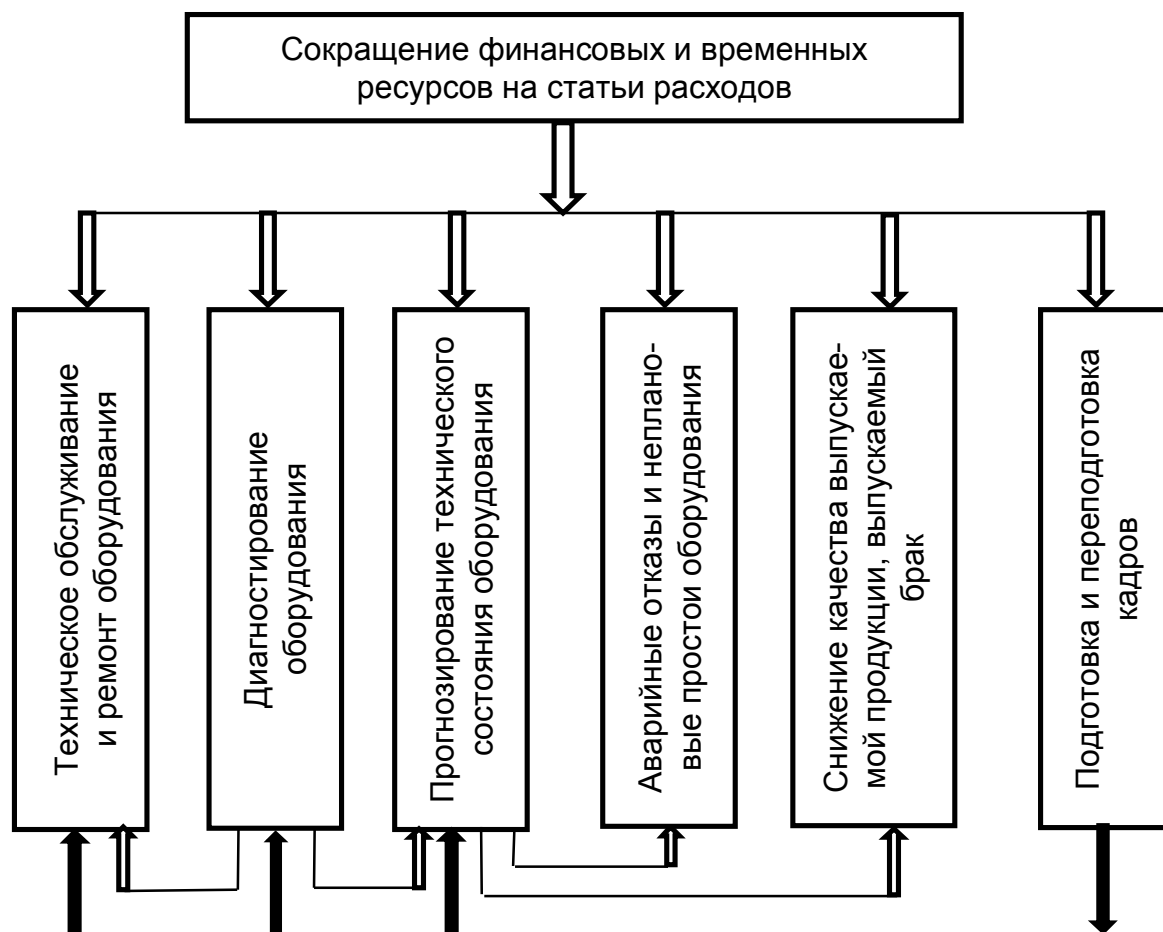


Рис. 2.7. Схема ресурсосбережения при эксплуатации оборудования

Сопряжение финансовых и временных ресурсов при технической эксплуатации оборудования возможно путем организации диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования, а это возможно лишь при соответствующей подготовке и переподготовке персонала, осуществляющего техническую эксплуатацию оборудования.

## 2.7. Системный подход к административному управлению предприятием

Система административного управления позволяет решить две основные задачи управления, направленные на рост производительности: рациональная организация труда, мотивация каждого работника к производительному и качественному труду [3]. Целостная система административного управления состоит из двух подсистем: организационной системы управления и системы административного управления персоналом.

*Организационная система управления* отвечает на вопросы: кто, что, как и когда должен делать в организации для эффективного выполнения ее целей и задач. Данная система включает в себя тщательно проработанную

структуру управления, положения о подразделениях и должностные инструкции, отлаженный документооборот, систему бюджетирования и планирования.

*Система административного управления персоналом* отвечает на вопросы: как нужно трудиться, как работникам строить отношения с руководителями и коллегами, как оплачивается и стимулируется труд, как руководителям правильно управлять подчиненным персоналом.

Целостная система базируется на основе эффективной системы оплаты труда, в рамках которой решена проблема мотивации персонала к производительному и качественному труду. Система повышает дисциплину и исполнительность всего персонала. Она наделяет действенными рычагами управления руководителей всех уровней, обеспечивая точное и неукоснительное исполнение каждым работником организации всех распоряжений непосредственного руководителя и приказов руководящих органов.

Система обеспечивает строгую дисциплину и исполнительность на каждом рабочем месте в масштабе всей организации.

Например, из-за отсутствия системы административного управления на предприятиях, как правило, сводится практически на нет и весь экономический эффект, связанный с модернизацией производства. Отсутствие данной системы порождает неповоротливость любой организации – персонал медленно и с неохотой осваивает новые технологии и оборудование. В результате, затраты на модернизацию производства начинают окупаться с большим опозданием, с трудом и очень медленно. А это огромные потери.

При системном подходе для успешной реализации технических и управленческих идей действуют следующие правила разработки и внедрения этих идей:

- 1) сильный и грамотный руководитель проекта – системотехник;
- 2) сокращение времени для оптимизации вариантов решения проблемы, для прогнозирования развития идей;
- 3) изложение мнений, экспертный анализ путей развития идей;
- 4) планирование – база для четкого и точного воплощения идей в жизнь;
- 5) быстрое осуществление работы;
- 6) продвижение результатов поэтапно, а не за счет большого скачка.

### **Контрольные вопросы**

1. Понятие о технике, технической системе машин и оборудовании.
2. Моральное старение машины в сферах ее производства и эксплуатации. Формы морального износа.
3. Фазы и этапы, «жизни» машины, стадии разработки конструкторской документации.

4. Содержание технического задания и предложения для эскизного, технического и рабочего проектов.
5. Особенности индивидуальных проектов машин.
6. Классификация факторов, определяющих развитие машины: внешние и внутренние; потребности, возможности и ограничения.
7. Классификационная система машин. Понятия о классе, роде, виде, разновидности, типоразмере, модели машины.
8. Основные принципы при конструировании машин: последовательность и инерционность разработки конструкторской документации; функциональная целесообразность и конструктивная преемственность, оптимизационное и ресурсное проектирование, типизация, комплексность, поточность, иерархичность и декомпозиция конструкции; унификация и стандартизация.
9. Тенденции развития параметров и конструкций машин.
10. Качественные показатели машин. Классификация.
11. Показатели технологичности машин.
12. Эстетические показатели.
13. Эргономические и санитарно-гигиенические показатели, показатели безопасности.
14. Показатели надежности.
15. Патентно-правовые показатели.
16. Показатели назначения. Экономические показатели.

### **3. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ**

Прогнозирование развитие систем – один из результативных методов принятия управленческих и технических решений в условиях от частичной определенности до полной неопределенности. Примем следующее определение прогнозирования. *Прогнозирование* – это вероятностное утверждение относительно будущего, необходимое для планирования в условиях неопределенности. *Прогноз* – это основа для планирования, для принятия решений.

Понятие «прогнозирование» следует отличать от понятий «предсказание» и «предвидение». Прогнозирование не имеет ничего общего с распространившимся в настоящее время шарлатанством в печати, на радио и телевидении типа «астрологический прогноз».

*Предсказание* – достоверное суждение о состоянии какого-либо объекта, процесса или явления в будущем, основанное на логической последовательности.



*Предвидение* – опережающее отражение действительности, основанное на познании законов развития объекта, процесса или явления.

*Планирование* – разработка плана на основе прогнозирования.

Прогнозирование – «вероятно будет». Предсказание – «будет». Планирование – «должно быть». Предвидение = прогнозирование + предсказание.

Прогностическая модель – модель объекта прогнозирования, исследование которой позволяет получить информацию о возможных состояниях объекта в будущем и (или) о путях достижения этих состояний.

### 3.1. Классификация методов прогнозирования

В настоящее время используется множество разнообразных методов прогнозирования, которые классифицируются по различным признакам. Существуют разные подходы к классификации методов. Но всем методам присущи некоторые общие черты:

- наличие причинно-следственных зависимостей. За основу прогнозирования принимается предположение, что те же причинно-следственные зависимости, которые существовали в прошлом, сохраняются и в будущем;

- прогнозы носят вероятностный характер. Абсолютно точный прогноз невозможен. Необходимо давать допуски на неточность;

- прогнозы для групп объектов обычно более точны, чем прогнозы для отдельных объектов, так как ошибки в прогнозировании для группы объектов, как правило, нейтрализуют друг друга. Например, прогнозирование расхода подшипников для одной машины менее точно, чем для нескольких машин;

- точность прогноза уменьшается с увеличением периода времени, которое охватывается данным прогнозом, – так называемого горизонта времени. Краткосрочные прогнозы обычно более точные, чем долгосрочные.

Прогнозирование обычно выполняют по следующим этапам:

- 1) определение цели прогноза;
- 2) установление горизонта времени прогнозирования;
- 3) выбор метода прогнозирования, составление модели прогнозирования;
- 4) сбор и анализ данных для прогноза;
- 5) собственно прогнозирование;
- 6) контроль прогноза на достоверность с внесением поправок.

Существует два подхода к прогнозированию: качественный и количественный. Качественные методы опираются на субъективные входные данные, используется «мягкая» информация, не поддающаяся количественной оценке, например человеческий фактор, личные мнения, догадки. Количественный подход опирается на использование статистических дан-

ных за определенный период или на разработку ассоциативных моделей, в которых используются для прогноза причинные переменные. Количественные методы состоят главным образом из анализа объективных, или «жестких», данных.

При качественных подходах используются прогнозы, основанные на суждении, мнении, прогнозы, в которых используются субъективные входные данные, такие, как мнения специалистов, например изготовителей и потребителей машин.

Количественные подходы используются в статистических и ассоциативных методах прогноза. В статистических методах используют статистический или временной ряд данных на основе предположения, что будущее будет подобно прошлому. В ассоциативных методах прогнозирования определяют поддающееся оценке прошлое развитие техники для предсказания ее развития в будущем.

Классификация является непременным условием прогнозирования. Обнаружение общих черт в различных предметах, их систематизация и отнесение к типу известных и детально описанных предметов представляют собой общенаучный способ прогнозирования. Классификация методов прогнозирования приведена на рис. 3.1.

*По информационному обоснованию* все методы прогнозирования делятся на три класса: фактографические, экспертные и комбинированные.

Фактографические методы следует отнести к научным, они базируются на фактическом информационном материале об объекте прогнозирования (ОП) и его прошлом развитии.

Экспертные методы базируются на информации, которую дают специальные эксперты. Экспертные методы могут быть прямыми и с обратной связью. При прямых экспертных методах обрабатываются независимые мнения экспертов. При методах с обратной связью имеется тот или иной метод воздействия на экспертов, например в виде мозговой атаки.

Комбинированные методы являются комбинацией фактографических и экспертных методов.

*По принципу обработки информации* фактографические методы делятся на статистические, методы аналогий, опережающие и экспертные.

Статистические методы объединены по принципу выявления в информации математических закономерностей развития и взаимосвязей характеристик объектов прогнозирования.

Под аналогией понимается сходство предметов в каких-либо признаках или отношениях (в математике – подобие). Метод аналогий заключается в выводах, сделанных о свойствах предмета или явления на основании его сходства с другими предметами или явлениями. Аналогия является скорее методом выдвижения предположений, чем методом доказательств.

Опережающие методы прогнозирования основаны на результатах обработки научно-технической информации (патентов, научных публикаций).

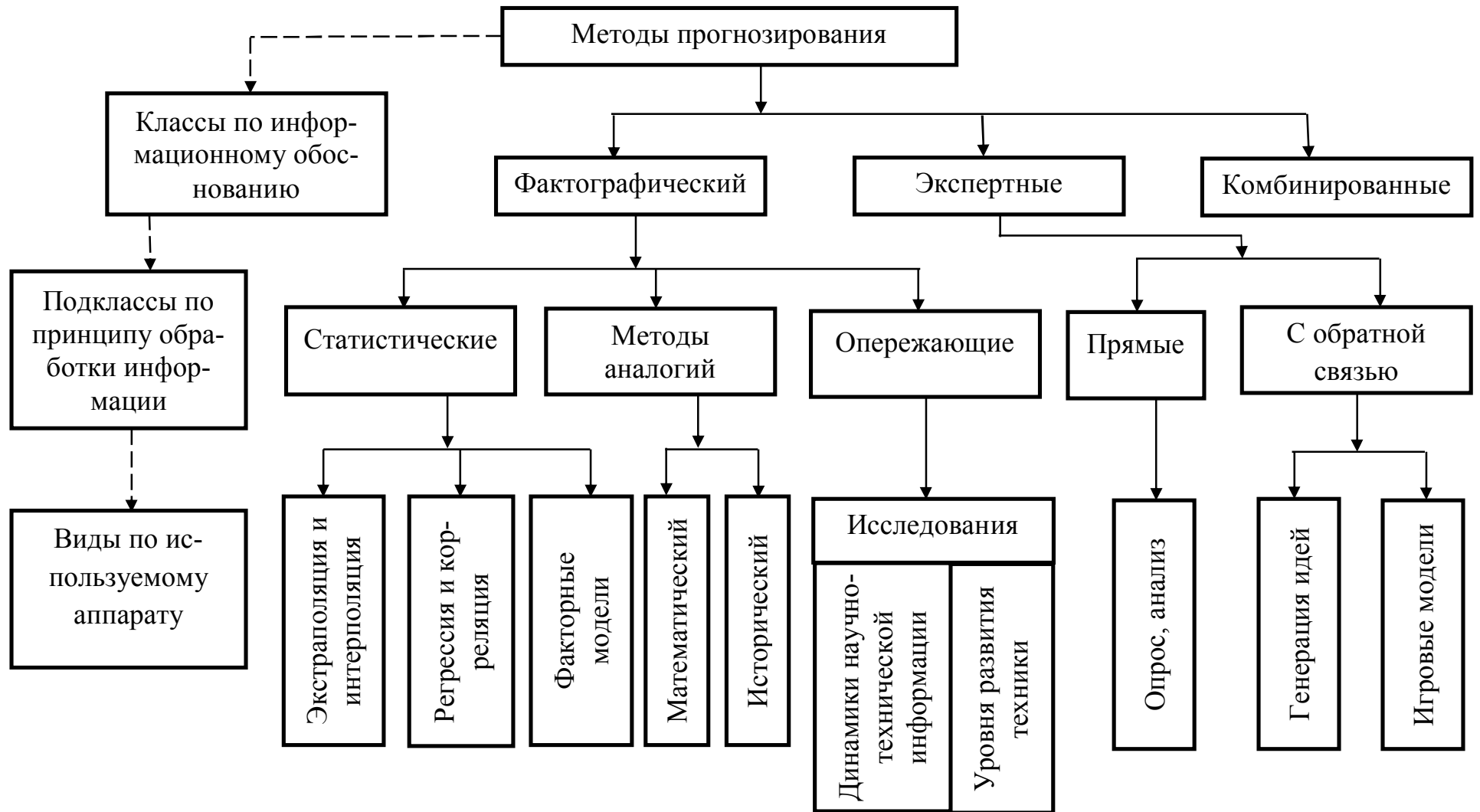


Рис. 3.1. Классификация методов прогнозирования

По *используемому аппарату* методы прогнозирования подразделяются на виды с одинаковым аппаратом реализации. Например, статистические методы делятся по видам на методы экстраполяции и интерполяции, регрессионные, корреляционного и факторного анализа.

Множество методов прогнозирования свидетельствует о том, что теория построения методов прогнозирования находится в состоянии развития.

## **3.2. Методы экстраполяции**

### ***Основные понятия***

Методы экстраполяции относятся к наиболее применяемым методам прогнозирования развития техники. На основе анализа статистических данных, характеризующих ОП за предшествующий период, т.е. на основе ретроспективного анализа развития машины, устанавливают изменение статистических данных в функции времени (т. е. временной ряд). Полагая априори, что выявленная закономерность развития будет сохраняться и в будущем, экстраполируя выявленную функцию за пределы ретроспективного анализа, прогнозируют развитие ОП.

Временной ряд – это упорядоченная во времени последовательность наблюдений, которые проводятся через равные интервалы времени. Методика прогнозирования, основанная на анализе данных временного ряда, предполагает, что будущие значения ряда могут быть определены исходя из прошлых значений. Выявляются одна или несколько закономерностей временного ряда: тенденция, сезонные изменения, циклы и постоянные изменения. Кроме того, могут проявляться случайные или нерегулярные изменения.

Тенденция – постепенное в течение длительного периода времени движение данных.

Сезонность – краткосрочные, регулярные изменения, связанные, например, с сезонами.

Циклы – волнообразные изменения с периодом времени более года.

Нерегулярные изменения вызываются необычными обстоятельствами и не имеют типичного поведения. Случайные изменения – это изменения, оставшиеся после выявления и исключения регулярных изменений.

### ***Методы сглаживания временного ряда***

В простейшем случае прогнозирование осуществляют путем построения предварительно сглаженного временного ряда и его графической интерполяции. Существует множество методов сглаживания экспериментального временного ряда. При методе скользящего среднего значения бе-

рется среднее от нескольких самых последних показателей прогнозируемого параметра ( $A_{cp.n}$ ):

$$A_{cp.n} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

где  $A_i$  – текущее значение переменной;

$n$  – число периодов времени в скользящем среднем значении.

В скользящем среднем значении при поступлении каждого нового фактического значения прогноз модифицируется, добавляется самое новое значение и удаляется старое, а затем заново вычисляется среднее. Прогноз скользит, отражая самые последние значения. В скользящем среднем значении вес всех составляющих (и старых, и новых) равный.

При определении взвешенного среднего значения самое позднее значение имеет больший коэффициент значимости. Например, при  $n = 4$  последнее значение может иметь коэффициент 0,4, предпоследнее 0,3, затем 0,2 и, наконец, 0,1.

При экспоненциальном сглаживании каждый новый прогноз основан на предыдущем прогнозе плюс процент разницы между этим прогнозом и фактическим значением параметра в этой точке:

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1}), \quad (3.1)$$

где  $F_t$  – прогноз для периода  $t$ ;

$F_{t-1}$  – прогноз для периода  $t - 1$ ;

$A_{t-1}$  – фактический параметр для прогноза  $t - 1$ ;

$\alpha$  – сглаживающая константа,  $\alpha = 0,05 \dots 0,5$ .

Для получения начального прогноза может быть использован, например, метод скользящего среднего значения. Обычная запись уравнения (3.1) имеет следующий вид:

$$F_t = \alpha A_{t-1} + \alpha(1 - \alpha)A_{t-2} + \alpha(1 - \alpha)^2 A_{t-3} + \alpha(1 - \alpha)^3 A_{t-4} + \dots$$

Более часто применяется процедура сглаживания, заключающаяся в определении уровня по некоторой совокупности окружающих точек, причем эта операция применяется вдоль ряда точек. Обычно при усреднении принимают нечетное число точек. Для сглаживания по трем точкам формулы имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{y}_0 &= \frac{1}{3}(y_{-1} + y_0 + y_{+1}); \\ \bar{y}_{-1} &= \frac{1}{6}(y_{-1} + 2y_0 - y_{+1}); \\ \bar{y}_{+1} &= \frac{1}{6}(y_{-1} + 2y_0 + 5y_{+1}), \end{aligned}$$

где  $y_0, \bar{y}_0$  – значения исходной и сглаженной функции в средней точке;

$y_{-1}, \bar{y}_{-1}$  – значения исходной и сглаженной функции в левой от средней точке;

$y_{+1}, \bar{y}_{+1}$  – значение исходной и сглаженной функции в правой от средней точке.

Функции  $\bar{y}_{-1}, \bar{y}_{+1}$  применяются только по краям интервала.

Функции для сглаживания по пяти точкам имеют вид:

$$\begin{aligned}\bar{y}_0 &= \frac{1}{5}(y_2 + y_{-1} + y_{+1} + y_{+2}); \\ \bar{y}_{-1} &= \frac{1}{10}(4y_{-2} + 3y_{-1} + 2y_0 + y_{+1}); \\ \bar{y}_{+1} &= \frac{1}{10}(y_{-1} + 2y_0 + 3y_{+1} + 4y_{+2}); \\ \bar{y}_{-2} &= \frac{1}{5}(3y_{-2} + 2y_{-1} + y_0 - y_{+2}); \\ \bar{y}_{+2} &= \frac{1}{5}(-y_2 + y_0 + 2y_{+1} + 3y_{+2}).\end{aligned}$$

Процесс изменения прогнозируемого параметра по данным ретроспективного анализа представляет сочетание регулярной (переменной)  $f(t)$  и случайной  $h(t)$  составляющих:  $y(t) = f(t) + \eta(t)$ .

Регулярные изменения составляющих называются тенденцией (трендом). Зависимости  $y(t)$  могут иметь ярко выраженную устойчивую тенденцию (тренд), неустойчивую тенденцию, отсутствие тенденции. Ясно, что метод экстраполяции применим при устойчивой тенденции. Устойчивость тенденции выявляется по выборочному коэффициенту корреляции:

$$r_{y,t} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.2)$$

где  $y_i$  – параметр машины, соответствующий времени  $t_i$ ;

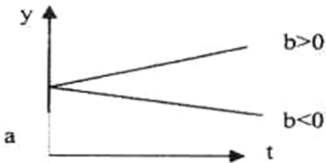
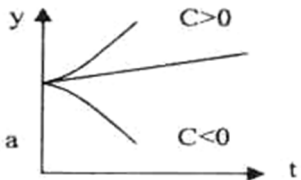
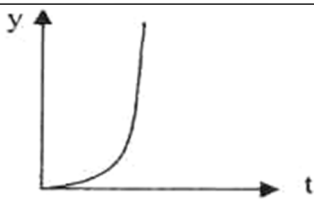
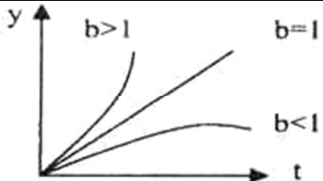

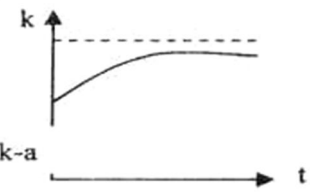

$\bar{y}, \bar{t}$  – средние выборочные значения времени и параметров машины.

Если  $r_{y,t} \geq 0,7$ , тренд устойчив, в противном случае тенденция неустойчива. При  $r_{y,t} \rightarrow 0$  корреляционная связь прогнозируемого параметра от времени отсутствует.

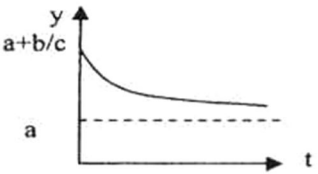
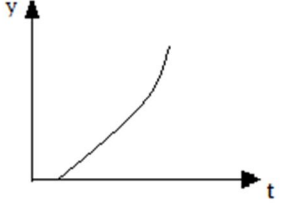
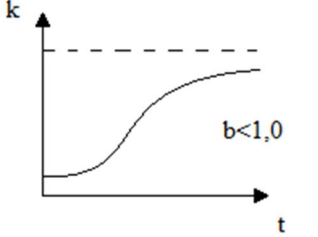
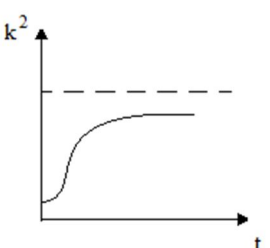
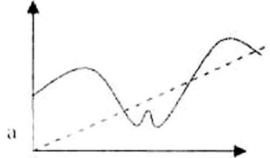
Метод экстраполяции дает результаты только в том случае, если правильно определены форма кривой, отражающей изменение параметров во времени, и область, на которую распространяется экстраполяция. Поэтому результаты ретроспективного анализа развития машины, представленные в виде функции, после предварительного сглаживания аппроксимируются желательнее наиболее простыми математическими зависимостями. Наиболее часто при разработке прогнозов используются простейшие функции, приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Элементарные функции, используемые при прогнозировании  
по методу экстраполяции

Наименование функции	Математическая зависимость	График функций
1	2	3
1. Линейная	$y = a + b \cdot t$	
2. Парабола	$y = a + b \cdot t + c \cdot t^2$	
3. Кубическая парабола	$y = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3$	
4. Степенная	$y = a \cdot t^b$	
5. Экспоненциальная	$y = a \cdot t^{bt}$	
6. Модифицированная экспонента	$y = k - a \cdot t^{bt}$	
7. S-образная кривая (логистическая) Перла	$y = k / (1 + b \cdot e^{-ct})$	

Окончание табл. 3.1

1	2	3
8. Гиперболическая	$y = a + b/(c + t)$	
9. Экспоненциально-степенная	$y = e^{at} \cdot t^b$	
10. Функция Гомпертца	$y = k \cdot e^{-be^{-ct}}$	
11. Квадратическая логистическая	$y = k^2 / (1 + b \cdot e^{-ct})^2$	
12. Колебательная	$y = a + b \cdot t + \sum_{i=1}^n c_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \beta_i)$	

Путем сопоставления сглаженного графика с простейшими функциями даются предварительные выводы о сходстве. После выбора одной из простых функций проводится расчет неизвестных параметров этой кривой. Для этого большей частью используется метод наименьших квадратов.

Итак, анализ тенденций включает поиск уравнения, которое опишет тенденцию. Тенденция может быть линейной и нелинейной.

### **Прогнозирование при линейной тенденции**

Линейное уравнение тенденции имеет вид

$$y_t = a + bt. \quad (3.3)$$



Коэффициенты прямой  $a$  и  $b$  могут быть вычислены из статистических данных за определенный период времени:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i y_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2};$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где  $t_i$  – определенный промежуток времени от  $t = 0$ ;

$n$  – полное число периодов;

$y_i$  – значение временного ряда в период времени  $t$ .

Рассмотрим пример прогнозирования объекта, параметры временного ряда которого (например, уровня продаж калькуляторов) приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Временной ряд объекта прогнозирования

Время $t_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Итого
Прогнозируемый параметр	700	724	720	728	740	742	758	750	770	775	7407
$t_i, y_i$	700	1448	2160	2916	3700	4452	5300	6000	6930	7750	41358

Следует определить прогнозируемый параметр в моменты времени  $t_{11}$  и  $t_{12}$ .

Из таблицы: для  $n = 10$   $\sum_{i=1}^n t_i = 55$ ;  $\sum_{i=1}^n t_i^2 = 385$ .

$$b = \frac{10 \cdot 41358 - 55 \cdot 7407}{10 \cdot 385 - 55 \cdot 55} = 7,51; \quad a = \frac{7407 - 7,51 \cdot 51}{10} = 699,4.$$

Линейное уравнение тенденции  $y = 699 + 7,5 \cdot t$ .

Для следующих двух периодов:

$$y_{11} = 699 + 7,51 \cdot 11 = 782;$$

$$y_{12} = 699 + 7,51 \cdot 12 = 789.$$

### Экстраполяция с использованием полиномов

Метод заключается в приближенном описании экспериментальной функции  $f(t)$  каким-либо полиномом. В тех случаях, когда сглаженная кривая монотонна с возрастанием или убыванием во времени (без экстре-

мальных точек) и имеет явно выраженный нелинейный характер, чаще всего используется степенной полином

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m. \quad (3.4)$$

Задача формулируется следующим образом: для функции  $f(t)$  найти полином  $y(t)$  возможно низшей степени  $m$ , принимающий в заданных точках  $i = (1, 2, \dots, n)$  те же значения, что и функция  $f(t)$  (рис. 3.2).

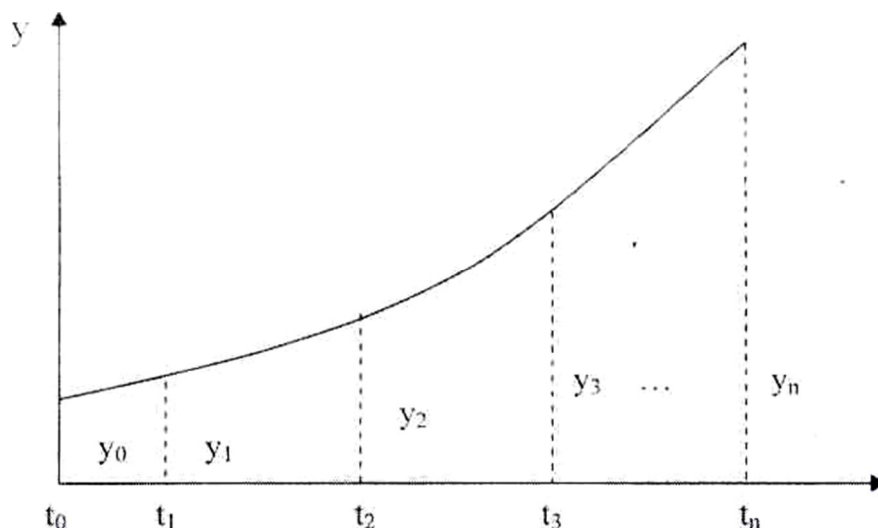


Рис. 3.2. К определению коэффициентов степенного полинома

Коэффициенты полинома находятся из системы уравнений:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 t_0 + \dots + a_m t_0^m &= y_0; \\ a_0 + a_1 t_1 + \dots + a_m t_1^m &= y_1; \\ a_0 + a_1 t_n + \dots + a_m t_n^m &= y_n. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Если  $n > m$ , то число узлов интерполирования принимают равным числу членов ряда ( $m = n$ ). В этом случае алгебраическая система уравнений (3.5) имеет единственное решение. После найденных коэффициентов полинома интерполяционный полином используется для экстраполяции. В этом случае в него подставляется значение горизонта прогнозирования за пределами функции  $f(t)$ .

Следует отметить, что математические зависимости 1, 2, 3, приведенные в табл. 3.1, являются частным случаем степенного полинома соответственно при двух, трех и четырех членах полинома.

Полином (3.4) используется, в частности, для описания развития многих видов износа (параметров технического состояния составных частей машин и оборудования, представленных обычно зависимостью, показанной на рис. 3.3). Параметр износа  $y$  имеет четыре стадии: период приработки (0-1); установившейся работы (1-2); возникновения и развития дефекта (2-3); аварийного разрушения (3-4).

Износ в стадии 1-2 описывается линейной зависимостью, а в стадии 2-4 – степенным полиномом (3.4) или экспоненциальной зависимостью 5, приведенной в табл. 3.2. Эта зависимость вытекает из следующих соображений. Скорость развития многих дефектов, например трещин, усталостного выкрашивания, зависит от величины дефекта:

$$\frac{dy}{dt} = ky^n, \quad (3.6)$$

где  $y$  – величина цикла;

$k$  и  $n$  – экстраполяционные параметры

На рис 3.3 обозначено:  $t_{np}$  – время приработки,  $t_{yp}$  – время накопления рассеянных повреждений,  $t_{ab}$  – время аварийного развития повреждения,  $y_{np}$  – предельное состояние повреждений.

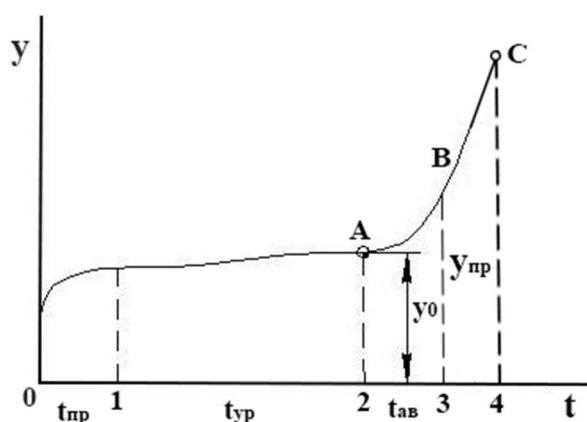


Рис. 3.3. Характеристика износа

Интегрирование дифференциального уравнения (3.6) дает экспоненциальное увеличение параметров дефекта  $y = y_0 e^{kt}$ , где  $y_0$  – параметр дефекта при последнем его измерении перед прогнозированием.

В случае прогнозирования периодических процессов используются тригонометрические полиномы вида:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^m (a_i \cos \frac{2\pi}{T} it + b_i \sin \frac{2\pi}{T} it), \quad (3.7)$$

где  $T$  – период изменения функции.

Коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  определяют по формулам:

$$a_i = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k \cdot \sin \frac{2\pi}{T} it_k; \quad b_i = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k \cdot \cos \frac{2\pi}{T} it_k,$$

где  $N$  – число интервалов в диапазоне времени, в котором измеряется параметр прогнозирования;

$y_k$  – значение функции при времени  $t_k$ .

Используется также зависимость 12 (табл. 3.1).

## Экстраполяция с применением S-образных функций

К S-образным относятся логистические кривые биолога и демографа Раймонда Перла (1870 - 1940 гг.) и математика Бенджамина Гомперца (1799 - 1865 гг.). Характерными особенностями логистических кривых является то, что они имеют точку перегиба, не содержат экстремальных точек и при бесконечном увеличении времени  $t$  асимптотически приближаются к некоторому предельному значению (рис. 3.4), где обозначено:  $a - k$  – участок ускоренного увеличения параметра  $y$ ;  $k - b$  – то же замедленного развития;  $k$  – точка перегиба;  $y_{\max}$  – максимальная величина прогнозируемого параметра при бесконечном увеличении времени  $t$ .

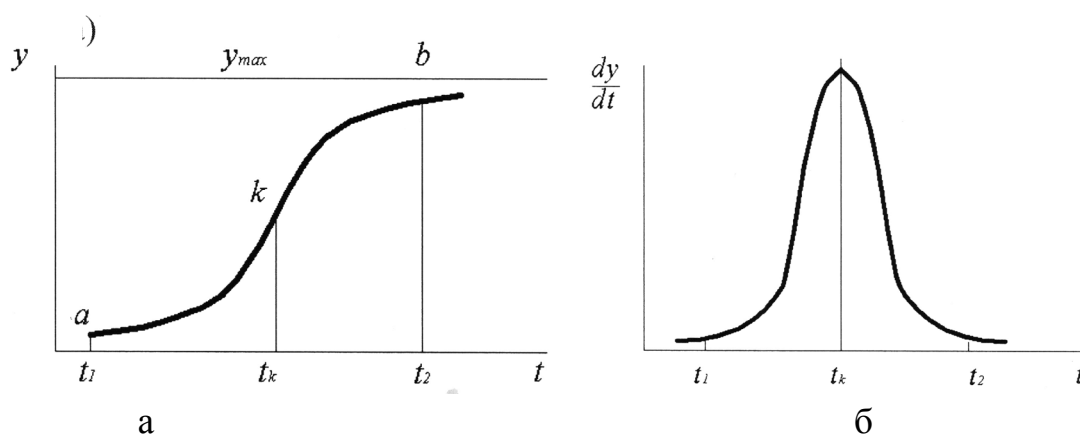


Рис 3.4. Форма логистической кривой (а) и её производной (б)

При дифференцировании логистической кривой по времени получим график скорости изменения (увеличения) прогнозируемого параметра, напоминающий по форме амплитудно-частотную характеристику одно-массовой колебательной системы.

Логистические кривые могут быть кососимметричными относительно точки перегиба и асимметричными относительно неё.

Кривая Перла симметрична относительно точки перегиба и имеет вид  $y = k/(1 + be^{ct})$  (см. зависимость 7 в табл. 3.1), где  $k$ ,  $b$ ,  $c$  – постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально.

Кривая Гомперца асимметрична относительно точки перегиба и имеет вид  $y = ke^{-be^{-be^{kt}}}$  или  $y = ka^{bt}$ , где  $k$  и  $b$  – постоянные коэффициенты (см. зависимость 10 в табл. 3.1).

Логистические кривые Перла и Гомперца нашли широкое применение в биологии для описания развития популяции видов. Закономерности, описываемые подобными кривыми, наблюдаются и в технике. Рассмотрим применение логистических кривых на примере прогнозирования параметров машины одного поколения. Такие кривые имеют несколько характерных участков (рис. 3.5).

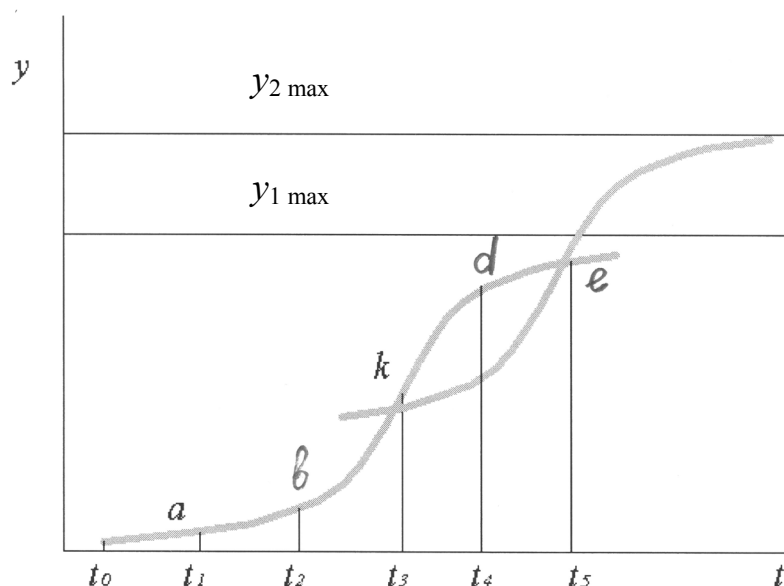


Рис. 3.5. S-образная кривая роста параметра одного поколения машин

Время "жизни" одного поколения машин  $t_{ж.п} = t_5 - t_1$ . В период  $t_1 - t_2$  появляются первые модели машин нового поколения, хотя преобладают машины старого поколения. Этот период, характеризующийся кривой  $a - b$ , называется латентным. Кривая  $b - d$ , соответствующая периоду времени  $t_2 - t_4$  бурного развития машин нового поколения, — это период роста. Но период роста не может быть бесконечным, возникает ограничение:  $y_{\max}$  — это максимальное значение параметра, которого можно достичь путем технического совершенствования машин данного поколения. Отрезок  $t_4 - t_5$  соответствует спаду темпов роста параметров машины. Необходима замена данного типа машин машинами нового поколения.

Точка перегиба  $k$  характеризует начальный момент замедления роста параметра машины.

В ряде задач прогнозирования используются квадратические логистические зависимости 11 (см. табл. 3.1).

В рамках времени развития машин одного поколения появляются машины следующих поколений с более высокими начальными параметрами, которые возрастают также по логистической кривой. Затем зарождаются и развиваются машины следующих поколений. Огибание кривых развития машин различных поколений также имеет характер логистической кривой. S-образные (логистические) кривые, отражающие развитие параметров машин и других объектов прогнозирования, подтверждают все законы диалектики.

В начальный, латентный, период развития постепенное количественное накопление факторов, способствующих развитию, приводит к качественному быстрому развитию (переход количественных изменений в коренные качественные). Со временем возникают и увеличиваются

отрицательные факторы, препятствующие развитию. В точке перегиба действие положительных и отрицательных факторов уравнивается.

После точки перегиба отрицательные факторы преобладают, и развитие замедляется – действует закон единства и борьбы противоположностей. В машинах следующего поколения повторяются процессы предыдущего поколения, но на более высоком уровне (закон отрицания отрицания). В настоящее время для прогнозирования параметров машин применяется несколько отличающаяся от кривых Перла и Гомперца S-образная кривая, получаемая из нелинейной модели прогнозирования. Предполагается, что темпы увеличения параметра машины нелинейно зависят от этого параметра в рассматриваемый момент времени. Такая функция обеспечивается нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dy}{dt} = f(y).$$

Функцию  $f(y)$  удобно представить степенным полиномом:

$$\frac{dy}{dt} = a_1y + a_2y^2 + \dots + a_ny^n.$$

Решение нелинейного дифференциального уравнения приводит к следующей формуле для прогнозирования развития машин:

$$y = \frac{\lambda}{a + e^{be^{-\beta(t-t_0)}}}. \quad (3.8)$$

В табл. 3.3 приведены примеры прогнозирования параметров машин, определенные по формуле (3.8). Коэффициенты  $\lambda$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  определены в результате обработки экспериментальных данных.

Таблица 3.3

Параметры прогнозирования машин

Наименование машины	Наименование параметров	Поколение машины	Начало отсчета, год	Коэффициенты			
				$\lambda$	$a$	$b$	$\beta$
Бумагоделательные машины	Ширина, м Производительность, м <sup>2</sup> /мин	Все	1860	11300	0,095	2,4	0,023
		1	1870	5200	0,074	1,81	0,049
		2	1900	12000	0,038	3,04	0,053
		3	1961		0,061	1,05	0,046
Картоноделательные машины	Производительность, м <sup>2</sup> /мин	1	1850	55	0,098	1,30	0,035
		2	1900	750	0,042	2,56	0,047
		3	1950	2500	0,018	1,35	0,053

Окончание табл. 3.3

Наименование машины	Наименование параметров	Поколение-машины	Начало отсчета, год	Коэффициенты			
				$\lambda$	$a$	$b$	$\beta$
Котел для варки целлюлозы сульфитным способом	Емкость, м <sup>3</sup> Производительность, т/сутки		1900	340	0,081	0,83	0,036
			1900	72	0,037	1,29	0,038
Котел периодического действия для варки сульфатной целлюлозы	Производительность, т/сутки		1900	135	0,078	4,23	0,046
Котлы для непрерывной варки целлюлозы	Производительность, т/сутки		1950	2100	0,074	3,72	0,085
Пресспаты	Удельная производительность, т/шт. (на 1 метр ширины)		1900	71	0,102	3,31	0,042

Закон диалектики – переход количественных изменений в качественные обуславливает чередование в процессах развития машин эволюционных и революционных этапов со скачкообразным переходом с одного поколения машин на другое. Для объединения частных тенденций, касающихся одного поколения машин, в единую общую тенденцию развития совокупности конкретных машин с единым функциональным назначением используют идею огибающих кривых. Например, построив кривые роста параметров машин 1-го, 2-го, 3-го и 4-го поколений и проведя огибающую, можем прогнозировать развитие еще несуществующего, 5-го поколения. Причем огибающая также имеет вид S-образной функции (рис. 3.6).

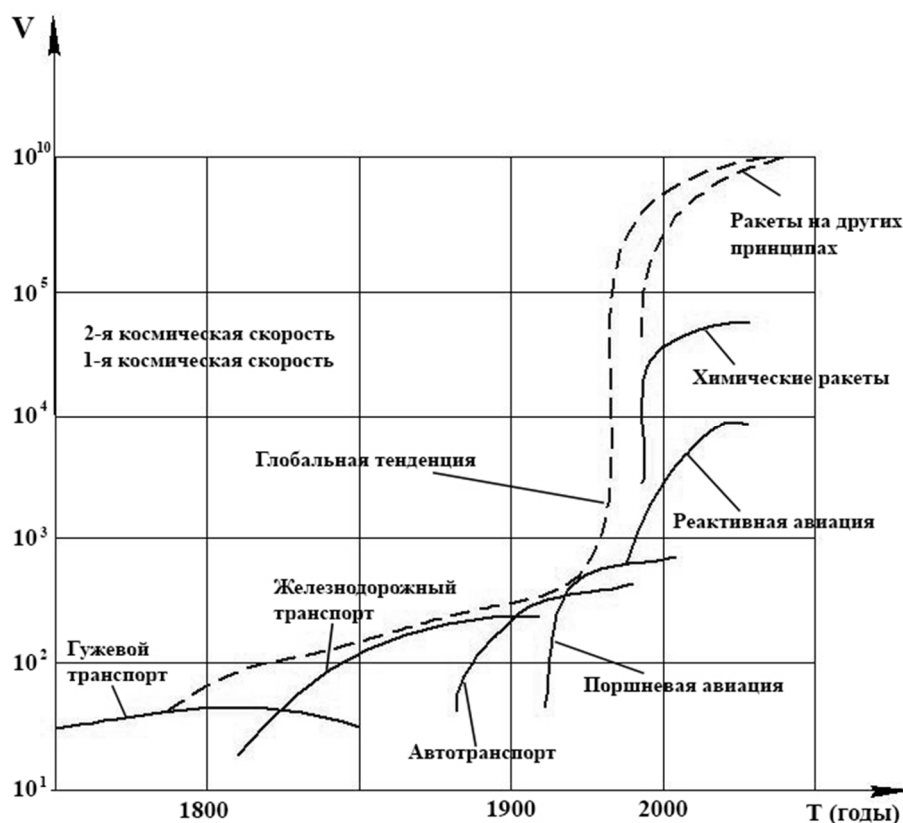


Рис. 3.6. Развитие транспортной среды (экстраполяция тенденции)

### 3.3 Методы аналогий

Методы аналогий заключаются в том, что выводы о свойствах предмета или явления делаются на основании его сходства с другими предметами или явлениями, тенденции развития которых хорошо изучены.

К методам аналогий можно отнести прогнозирование развития объекта или явления с использованием феноменологических или модельных математических моделей (математического подобия), описывающих известные объекты или явления, и использование этих моделей в проектируемом изделии. Например, интенсивность обезвоживания бумажного полотна в прессах бумагоделательных машин зависит от скорости машины, диаметра валов и твердости их облицовки, линейного давления между валами, от свойств сукна и бумаги и от множества других факторов. Эти зависимости отражаются в экспериментальных расчетных формулах, полученных профессором Н.Е. Новиковым. При проектировании прессов новой машины, несомненно, эти формулы, являющиеся математическим аналогом процессов, возникающих при прессовании, используются. По сути, все расчетные зависимости, используемые при проектировании машин, являются примерами математических аналогий. Здесь нет необходимости развивать это направление методов аналогий.



Метод регрессии, по сути, также относится к методам аналогий при прогнозировании, так как позволяет при определенных условиях прогнозировать события  $y$  по аналогии с событиями  $x$ , технические развития которых известны.

### **Корреляционные и регрессионные методы прогнозирования**

Корреляционные и регрессионные методы прогнозирования заключаются в установлении корреляционной и регрессионной связи между событиями в том случае, когда априори можно предположить о существенной взаимосвязи двух или нескольких событий.

Корреляционная связь двух событий характеризуется коэффициентом корреляции

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y}, \quad (3.9)$$

где  $x_i, y_i$  – значения  $i$ -й причины событий соответственно  $x, y$ ;

$n$  – число признаков;

$\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение переменных:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i;$$

$\sigma_x, \sigma_y$  – среднеквадратические отклонения:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}}.$$

Если  $r_{xy} = 0$ , то корреляционная связь между  $x$  и  $y$  отсутствует, если  $r_{xy} = 1$ , то  $y$  растет линейно с  $x$ , если  $r_{xy} = -1$ , то  $y$  убывает линейно с ростом  $x$ . Значение  $0 < r_{xy} < 1$  характеризует некоторые промежуточные связи между  $x$  и  $y$ .

Коэффициент корреляции определяет степень рассеяния эмпирических точек от линейной зависимости вида

$$y - \bar{y} = r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}). \quad (3.10)$$

Эта зависимость называется линией регрессии  $y$  по  $x$ . Достоверность прогнозирования возрастает с увеличением абсолютной величины коэффициента корреляции. Считается, что прогнозирование одного события по известной тенденции другого события возможно при коэффициенте корреляции  $|r_{xy}| \geq 0,7$ .

При наличии корреляционной связи между двумя событиями, когда по данным одного из них хотят предсказать другое, используется уравнение

регрессии. Простая линейная регрессия выражается уравнением  $y = a + bx$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные величины, определяемые по формулам:

$$a = \bar{y} + r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}; \quad b = -r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}.$$

Коэффициент  $r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$  называют коэффициентом линейной регрессии. Он определяет угол наклона линии регрессии к оси  $x$  (рис. 3.7), где  $\operatorname{tg} \beta = r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ . Обычно уравнение линейной регрессии представляется в виде

$$y = r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x} + \left( \bar{y} - r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x} \right). \quad (3.11)$$

Частным случаем использования регрессии в прогнозных исследованиях является степенная парная регрессия, описываемая формулами

$$x_1 = f(x_2), \quad x_2 = f(x_3), \quad x_3 = f(x_4), \quad x_n = f(x_{n+1}).$$

По этой схеме, например, можно исследовать взаимосвязь стоимости  $x_1$ , производительности труда  $x_2$ , фондовооруженности  $x_3$ . Можно определить также множественную регрессию в виде линейного уравнения

$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n + a_2, \quad (3.12)$$

а также в виде различных нелинейных уравнений.

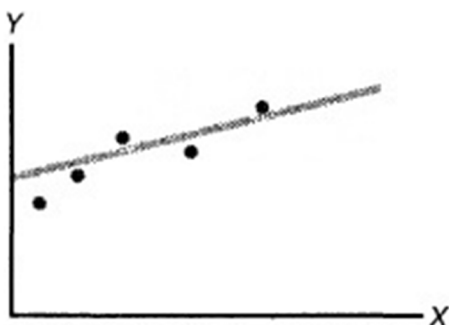


Рис 3.7. График уравнения линейной регрессии

Обычно множественная регрессия находится по методам, применяемым при обработке факторного эксперимента, изучаемого в курсе «Основы научных исследований».

К методам аналогий условно можно отнести методы альтернативистики. Альтернативистика (ретроальтернативистика) – это направление в современной прогностике, в котором исследуются возможные пути развития техники, технологии, инвестиции, политики, альтернативные существующим.

Каковы цели альтернативистики? Ведь говорят: «Что было, то было, и прошлого не изменить, сам Бог не может прошедшее сделать непродешшим». И не является ли схоластикой, досужим упражнением ума «что бы

было, если бы было». Цель альтернавистики - извлечение уроков из прошлого для настоящего и прогнозирования будущего.

Как всякая наука, альтернавистика в отличие от научной и ненаучной фантастики базируется на определенных научно обоснованных критериях реальности, логики, сопоставимости и оптимальности.

*Критерий реальности*, отсекающий все заведомо фантастичные версии. Например, можно представить, что на заре механизации было взято направление на использование колесных, а не гусеничных тракторов, и абсолютно нереально использование для трелевки леса вертолетов. Или можно представить войну 1812 г. без Бородино и пожара Москвы, но недопустимо вооружать воюющие стороны пулеметами и танками, а на место Кутузова ставить Александра Невского или Жукова.

*Критерий логики*, устанавливающий причинно-следственные связи любых допущений. Например, если бы было принято решение использовать всю биомассу лесосеки в виде щепы, то реализация его невыполнима из-за отсутствия мощностей и технологий. Вряд ли землетрясение в Армении явилось причиной разрушения СССР.

*Критерий сопоставимости*, требующий сопоставлять только сопоставимое. Например, выход России из кризиса в эпоху лжедмитриев и лжедемократов. Трудно сопоставить события в Чечне и партизанское движение в Белоруссии, но можно сопоставить поведение Кутузова и стратегию скифов, когда в 513 г. до н.э. в их земли вторглась армия персидского царя Дария. Скифы не стали с ним сражаться, а заманили вглубь степей, где захватчики стали страдать от голода и потом бежали.

*Критерий оптимальности*, позволяющий делать конструктивные выводы из «уроков истории». Например, оптимальным было бы решение Наполеона не лезть вглубь России, а ограничиться восстановлением Речи Посполитой «от моря до моря» и натравить на Россию польское ополчение, а одновременно прокламацией об освобождении крестьян спровоцировать в России пугачевщину.

### 3.4. Опережающие методы прогнозирования

К опережающим относятся методы прогнозирования, основанные на анализе патентов и научно-технической информации. Патентная информация обладает рядом важных признаков, выгодно отличающих ее от других видов научно-технической информации:

- новизной – в силу самой специфики патентования;
- достоверностью – патентуются только те технические решения, которые можно осуществить;
- концентрированностью – информация излагается только один раз, а не повторяется произвольно, как это имеет место в статьях и других публикациях;

– формализованностью – все описания к патентам каждой страны имеют форму, расположены в определенном классификационном порядке, а предмет изобретения изложен в строгой последовательности;

– полнотой - практически все новые и ценные идеи патентуются.

Патентная информация позволяет выявить перспективные направления разработок, а остальные виды качественной информации дают возможность оценить их эффективность и целесообразность реализации в серийных образцах машин.

Прогнозирование направлений развития конструкций с использованием патентной информации представляет собой процедуру выявления целей (т.е. задач, решаемых отдельными техническими разработками, защищенными патентами и авторскими свидетельствами) и способов достижения этих целей, т.е. конкретных конструкторских предложений. Для этого из систематизированного массива патентов выделяют «одноцелевые» группы изобретений, причем внутри каждой одноцелевой группы патенты располагаются по типам конструктивных элементов, которые они совершенствуют. Полученная таким образом матрица «цель - средства достижения цели» дает возможность представить общую картину акцентов творческой активности изобретателей и выявить те цели (проблемы), которые, по мнению специалистов в данной области, считаются наиболее важными.

Большинство типов машин находятся на стадии развития, когда еще не исчерпаны возможности их модернизации в рамках технических принципов, определяющих типы машин. Этот период развития конструкции машин обычно связан с появлением большого числа патентоспособных предложений, усовершенствующих конструкции отдельных функциональных элементов машин. Такие изобретения и составляют основную часть тематического информационного массива патентов. Но есть изобретения, не имеющие прототипа, так называемые пионерные изобретения. Имеются в виду одиночные изобретения, еще не обросшие изобретениями, развивающими данный новый технический принцип. В этом случае пионерное изобретение или не является кардинальным решением проблемы, или еще не получило должной конструктивной разработки, позволяющей осуществить техническое воплощение нового принципа. И в этом и в других случаях это изобретение не сможет оказать влияние на развитие машины в прогнозируемый период в силу объективно существующего лага между появлением новой технической идеи и ее широким практическим применением. Тем более, это практически не повлияет на технико-экономический уровень парка машин.

Результаты анализа патентной информации позволяют определить направление поиска другой опережающей информации (научно-технических отчетов, журнальных статей и т.п.), которые могут помочь в поиске эффективного средства достижения поставленной цели. Кроме того, анализ патентной информации дает исходный материал для проведения экспертного опроса с целью выявления наиболее важных вероятных направлений развития

конструкций данного типа машин, определения наиболее эффективных принципиальных путей решения проблемы, установления степени влияния того или иного направления, которое было выявлено в результате анализа патентной информации.

Идея прогнозирования на основе анализа патентной информации исходит из следующих фактов:

- техническое решение, зафиксированное в патенте, будет внедрено через 8 - 10 лет и более;
- существует связь между динамикой информации и научно-техническим прогрессом;
- отклонения в информации нивелируются законом больших чисел.

Исходя из динамики патентов, определяются темп роста и темп прироста – основные показатели тенденции научно-технического прогресса. Под темпом развития прогресса понимается отношение числа элементов патентования за год к их среднему числу за больший промежуток времени. Под ускорением прироста прогресса понимается разность скоростей развития прогресса (темп развития) за определенный промежуток времени, отнесенная к числу лет, за которые эта разность взята.

Анализ патентов за 5 - 6 лет позволит предвидеть возможности будущей техники. Количество патентов, выданных в первый (нулевой) год, с которого начинается анализ патентов, сравнивается с их количеством в последующие годы. Если число патентов в каждом из пяти последующих лет превышает их число в первом году, то это направление техники будет развиваться в течение 5 - 6 лет, если их меньше, то интенсивность развития будет снижаться. Интенсивность появления патентов свидетельствует о бурном развитии направления. Если патенты в течение изучаемого периода не выявлены, то направление развития техники бесперспективно.

Если количество патентов или статей нарастает с возрастающим темпом (до точки перегиба), то техническую идею или конструктивное решение следует полагать применимым для реализации. Если темпы прироста убывающие (за точкой перегиба), то техническая идея или решение угасает, и использование их становится проблемным.

### **3.5. Экспертные методы прогнозирования**

Методы экспертных оценок используют возможность человека отражать с опережением окружающую действительность в своем сознании. Необходимая для прогнозирования информация содержится в мнениях квалифицированных экспертов по вопросам прогнозирования. Мнения формируются независимо друг от друга, собираются специалистами и подвергаются статистической обработке. В результате вырисовывается усредненная картина будущего, а также возможные ее варианты. Метод независимых экспертов называется иногда методом Делфи (от названия древнегреческого города Делфи, известного своим оракулом).

Экспертные оценки проводятся на основе обработки результатов опроса экспертов. Методы опроса могут быть личные (очные) и заочные - путем пересылки анкет при соблюдении следующих правил:

- исключаются контакты между экспертами и обсуждение ответов (условие независимых мнений);
- сохраняются в тайне имена опрашиваемых (условие стабильности оценок).

Нарушение этих условий может привести к искажению получаемых сведений, их дублированию, влиянию на них личных обстоятельств, например авторитета или известности иного эксперта, его должности.

По форме вопросов различают открытые и закрытые, прямые и косвенные методы опросов. Вопрос называют открытым, если ответ на него может быть в любой форме, а закрытым, если в формулировке вопроса содержатся варианты ответа. При косвенных методах вопрос задается в замаскированном виде в тех случаях, когда нет уверенности в искренности эксперта. По результатам опросов строятся гистограммы ответов, определяются средние арифметические значения, мода, медиана, средние квадратические отклонения, коэффициенты вариации. Гистограммы и статистическая обработка результатов применяются при прогнозировании систем, выраженных числовыми характеристиками, либо в виде отдельных границ прогнозируемых параметров, либо в описательном виде в случае прогнозирования развития систем общего характера.

Экспертные методы прогнозирования применяются в следующих случаях:

- 1) при отсутствии достоверной статистики прогнозирования;
- 2) при долгосрочном прогнозировании объектов новых отраслей промышленности (в условиях дефицита времени и в экстремальных ситуациях);
- 3) при отсутствии надлежащей теоретической основы развития объекта прогнозирования.

Требования к эксперту (от латин. *expertus* – опытный):

- эксперт должен быть признанным специалистом в данной области знаний;
- оценки эксперта должны быть стабильны во времени и независимы от условий (не флюгер и не хамелеон);
- дополнительная информация о прогнозируемых признаках лишь улучшает оценку эксперта;
- эксперт должен иметь некоторый опыт прогнозирования;
- должна отсутствовать моральная, профессиональная и материальная заинтересованность эксперта в экспертных оценках.

К экспертным относятся методы коллективной генерации идей, в частности метод «мозговой атаки», которая осуществляется в процессе коллективного обсуждения актуальной проблемы. Процесс выдвижения

идей при «мозговой атаке» происходит лавинообразно. Выдвинутая идея порождает либо творческую, либо критическую реакцию, что стимулирует появление новых идей. Групповое мышление производит на 70 % больше ценных новых идей, чем сумма индивидуальных мышлений.

Кроме описанных, существует множество других методов, с которыми, при необходимости, можно ознакомиться в специальной литературе. Заслуживают внимания, в частности, логические методы, метод построения сценария развития техники и прогнозных графов, методы логических моделей, матричные методы и другие.

Методы логического моделирования предполагают построение логических моделей, в которых проводятся аналогии между различными по своей природе явлениями, анализируются взаимосвязи отдельных наук с учетом научно-технического и экономического развития.

Матричный метод является нормативным методом прогнозирования, в котором задаются конечные цели и в процессе прогнозирования определяются пути и средства их достижения. Последовательность операций по матричному методу:

- идентификация факторов, влияющих на достижение поставленных целей;
- группировка факторов по характеру их влияния;
- формирование методов влияния комплексных факторов друг на друга и на достижение целей;
- определение влияния факторов на достижение комплекса целей.

### 3.6. Оценка достоверности и точности прогноза

При прогнозировании возникают проблемы, среди которых наиболее острыми являются оценки точности прогноза и сравнительные характеристики существующих методов прогнозирования. Есть предположение, что точность прогноза убывает пропорционально квадрату времени срока прогнозирования, но в общем виде это не доказано.

При прогнозировании наиболее существенными ошибками являются ошибки в исходных данных, в методе и модели прогнозирования. Ошибки в исходных данных – это ошибки измерения, полноты и достоверности исходных данных при ретроспективном анализе параметров машин. Ошибки метода прогнозирования связаны с выбором метода, неидентичного объекту прогнозирования. Ошибки модели возникают вследствие упрощения модели и несовершенства представления о природе и других характеристиках объекта прогнозирования.

По мере того, как увеличивается период упреждения прогноза (горизонта прогнозирования  $T_y$ ), ошибка прогноза  $E_T$  увеличивается по зависимости (3.13), где  $E_{cp}$  – средняя ошибка применяемого метода прогнозирования.

$$E_T = E_{cp} + 0,01 \cdot T_y(1 + E_{cp})^3. \quad (3.13)$$

Для уменьшения ошибок необходимо подтверждение прогнозов (верификация прогнозов). Верификация прогнозов - одна из важнейших задач прогнозирования развития техники. Существует несколько методов верификации:

- 1) прямая верификация - сопоставление результатов прогнозирования, полученных различными методами;
- 2) косвенная верификация - подтверждение прогноза со ссылкой на известные литературные источники;
- 3) консеквентная верификация – получение прогнозируемой величины, как следствие из уже известных прогнозов;
- 4) инверсная верификация – экстраполяция прогнозов на некоторый отрезок прошлого времени и сопоставление их с фактическими значениями, соответствующими этому периоду.

### **3.7. Прогнозирование технического уровня и качества машин и оборудования**

Как уже отмечалось, прогнозирование не является самоцелью, а служит основой для принятия решения, для составления плана, для обоснования технического предложения при планировании. Методическое и структурное единство прогнозирования и планирования состоит в том, что они имеют одинаковую информационную основу и являются последовательными этапами решения задач повышения технического уровня и качества машин и оборудования при их проектировании. Причем прогнозирование может рассматриваться как этап предпроектной многовариантной проработки, а планирование – как этап решения.

При решении вопроса о выборе перспективных научно-технических направлений, при создании оборудования приходится сталкиваться с неопределенным множеством решений. При разработке прогноза неопределенность уменьшается и формируется конечное множество альтернативных вариантов, причем каждый из них является наилучшим с точки зрения учитываемых внешних условий (факторов прогнозного фона) и выбранной модели (тенденции) развития данного направления. Принятие решения связано с выбором из множества прогнозных вариантов наиболее перспективного (приоритетного) направления, удовлетворяющего определенному критерию.

Принципиальные различия прогнозирования и планирования заключаются в следующем:

- срок, на который разрабатывается прогноз, превосходит срок, на который должен быть разработан план, так как точность прогнозной



информации уменьшается с увеличением горизонта прогнозирования, и она не имеет директивного характера. Разработка прогнозов даже с относительно невысокой точностью дает положительный управленческий эффект, так как уменьшает неопределенность в оценке тенденций развития объекта прогнозирования, чем снижается вероятность ошибки при принятии плановых или управленческих решений;

– сроки и объемы выпуска, технико-экономические показатели продукции и другие результаты прогноза имеют ориентирующий, вероятностный характер и предполагают принципиальную возможность внесения корректировок. План, в отличие от прогноза, не допускает вероятностных оценок и содержит директивные сроки осуществления события;

– разработка прогнозов предполагает обязательную многовариантность. Это в дальнейшем дает возможность утвердить один из альтернативных вариантов в качестве планового задания, которое содержит директивную систему показателей и, как правило, не допускает внесения корректировок.

При разработке прогнозов развития машин и оборудования должны соблюдаться принципы системности, комплексности, многовариантности, непрерывности.

*Принцип системности* заключается в необходимости учета факторов, внешних по отношению к объекту прогнозирования. Применительно к задачам прогнозирования технического уровня и качества машин принцип системности означает перспективную оценку экономических, социальных, демографических и других факторов, которые могут накладывать определенные требования на технико-экономические показатели машин. Например, все большее значение будет иметь требование к снижению энергоемкости машин.

*Принцип комплексности* предполагает наличие поискового и нормативного этапов разработки прогноза. В частности, перспективная оценка показателей технического уровня и качества объекта прогнозирования представляет собой поисковый этап разработки прогноза, а прогнозирование затрат всех видов материальных ресурсов, средств и путей достижения указанных показателей – нормативный этап. Поисковый и нормативный этапы разработки прогноза образуют в совокупности комплексный прогноз, который обуславливает выбор не только технических показателей, но и оценку затрат на достижение показателей создаваемой машины.

*Принцип многовариантности* заключается в том, что результат прогноза, как правило, представляет собой несколько вариантов создаваемой машины с учетом различных сроков ее реализации в промышленном производстве, каждый из которых зависит от факторов – горизонтов прогнозирования, от тенденции развития данного вида техники и др.

Важным принципом разработки комплексных прогнозов является *непрерывность прогнозирования*, при которой вносятся корректировки в

разрабатываемый прогноз в связи с необходимостью учета нарастания темпов научно-технического прогресса.

Срок, на который разрабатывается прогноз, должен всегда превышать срок планового задания. Например, если разработан прогноз качественного повышения технических показателей в результате смены поколений какого-либо вида машин до 2020 г., то плановые задания целесообразно устанавливать на ближайшие 5 лет.

Эффект от проведения прогнозных оценок представляет собой результат предотвращения ущерба, возникающего от негативных последствий научно-технического прогресса, от недостаточно высокого уровня потребительских свойств новой машины и других факторов, обусловленных принятием плановых решений без предварительной прогнозной проработки.

### **3.8. Прогнозирование ресурса оборудования при его эксплуатации**

Технический ресурс – это показатель долговечности, характеризующий запас возможной наработки объекта. Ресурсом называют наработку объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступления предельного состояния, а при диагностировании оборудования – от момента диагностирования до наступления предельного состояния. Поскольку прогнозирование ресурса является одной из задач диагностирования, вопросы прогнозирования с той или иной степенью проработанности находят описание во всех работах по диагностике.

В качестве меры ресурса может быть выбран любой параметр, характеризующий продолжительность эксплуатации объекта, например, время работы в часах, для автомобилей – пробег в километрах, для бумагоделательных машин – выработка в тоннах бумаги, число циклов работы, число варок в установках для варки целлюлозы и т.п.

Начальный момент времени при исчислении остаточного ресурса выбирается в момент последнего контроля или диагностирования. Понятие предельного состояния составной части машины имеет различное толкование. Мы принимаем за предельное - предаварийное состояние.

Остаточный ресурс, или остаточный срок службы, – это продолжительность эксплуатации от данного момента времени до достижения предельного состояния. При эксплуатации оборудования прогнозирование остаточного ресурса осуществляется индивидуально для каждой машины и каждой ее составной части.

Индивидуальное прогнозирование ресурса позволяет предупреждать отказы и непредвиденные достижения предельных состояний, более правильно планировать режимы эксплуатации, профилактические мероприя-

тия и снабжение запасными частями. Индивидуальное прогнозирование увеличивает средний ресурс машин, поскольку уменьшает долю машин, преждевременно снимаемых для ремонта, дает возможность обоснованного выбора оптимальных межремонтных периодов.

Прогнозирование ресурса составных частей оборудования дает возможность перехода от планово-предупредительной системы к организации ремонта и технического обслуживания по состоянию с контролем параметров технического состояния (ТС). Достоинством ремонтов по ТС является более полное использование ресурса составных частей оборудования, возможность замены деталей, достигающих околопредельного ТС, и снижения аварийности в работе оборудования. Эффект достигается сокращением простоев в ремонте и увеличением выпуска продукции. Появляется возможность более обоснованно назначать объемы и периодичность ремонтов, определять их трудоемкость, совершенствовать организацию подготовки к ремонту.

Прогнозирование ресурса оборудования при эксплуатации принципиально возможно лишь при известных закономерностях изменения параметров ТС от наработки и известных предельных состояниях этих параметров. Поэтому следует в нормативно-технической документации на конкретные виды оборудования установить номенклатуру параметров ТС, по которым необходимо определять допускаемое отклонение, а также дать перечень составных частей машины, по которым необходимо прогнозировать остаточный ресурс.

Номенклатура параметров для установления их допустимого отклонения выбирается с учетом экономических последствий и снижения безопасности работы. Для первых допускаемое отклонение параметра устанавливается с учетом условий обеспечения минимума суммарных издержек, связанных с устранением последствий отказов и предупредительными операциями при техническом обслуживании и ремонте, для вторых – с учетом условий обеспечения максимальной вероятности безотказной работы составных частей в межконтрольный период.

Показатели изменения параметра ТС, ресурса и наработки составной части устанавливают в результате анализа технической документации и статистической обработки данных испытаний. Выявляется ТС путем непосредственных измерений параметров ТС и косвенно - по диагностическим признакам. Прогнозирование остаточного ресурса по диагностическим признакам ТС оборудования возможно лишь при одновременном выполнении следующих условий:

- имеется информация о математических моделях изменений структурных параметров ТС и их диагностических признаков во времени;
- известны физические процессы, приводящие к ресурсным отказам;

– установлены для каждого структурного параметра ТС предельные значения, достижение которых определяет величину ресурса по данному параметру;

– имеется информация о связи (детерминированной или стохастической) между структурными параметрами и диагностическими признаками ТС;

– зависимость между математическими ожиданиями структурных и диагностических признаков ТС является монотонной и непрерывной.

В общем виде связь между структурными параметрами ТС  $(x_1, \dots, x_r)$  и диагностическими параметрами  $(y_1, \dots, y_r)$  описывается регрессионными зависимостями:

$$x_1 = F_1(y_1, \dots, y_e, a_{11}, \dots, a_{1e}) + \varepsilon_1; \quad (3.14)$$

$$x_2 = F_2(y_1, \dots, y_e, a_{21}, \dots, a_{re}) + \varepsilon_2,$$

где  $F_i(y_1, \dots, y_e, a_{21}, \dots, a_{re})$  – детерминированная функция;

$a_{e1}, \dots, a_{re}$  – коэффициенты детерминированной взаимнооднозначной зависимости;

$\varepsilon_i$  – случайные погрешности.

Важнейшим вопросом при прогнозировании ресурса является обоснованный выбор диагностических параметров. Это может быть общий уровень вибросигнала в информативной полосе частот,  $n$ -мерный спектр гармонических составляющих, величина ударных импульсов, эксцесс и другие параметры. Причем выбор диагностических параметров определяется решаемыми задачами:

1) обнаружение зависимости между моментом зарождения и градиентом развития дефекта на ранней стадии его проявления и моментом отказа механизма, вызванного последствиями развития этого дефекта;

2) выявление предаварийных состояний, когда дальнейшая эксплуатация объекта может привести к отказам с катастрофическими последствиями.

Для решения первой задачи, когда изменения прогнозируемых параметров состояния и соответствующих параметров вибрационного сигнала (ВС) незначительны, необходимо применять тонкие методы анализа сигналов. Во втором случае обычно ограничиваются анализом энергетических характеристик сигнала, например значениями уровней спектральных составляющих, характеризующих предельное значение параметров ТС.

Здесь рассмотрен один из методов решения задач второй группы – метод экстраполяции мощности спектральных составляющих ВС при следующих предположениях:

– вероятные изменения амплитуд спектральных составляющих ВС исследуемой машины на прогнозируемый период определенным образом связаны с их значениями в прошлом, т. е. в интервале наблюдения;

– закономерность изменения амплитуды каждой из спектральных составляющих ВС с увеличением наработки машины имеет монотонный характер.

Следует отметить, что при прогнозировании ресурса проявляются общие черты, присущие всем методам прогнозирования развития объектов, процессов, явлений, описанных в подразделе 3.1.

При прогнозировании ресурса важнейшее значение имеют основные закономерности развития параметров ТС и параметров, характеризующих предельные состояния. Предельные состояния подразделяется на две группы. Первую группу образуют предельные состояния, наступившие в результате постепенного накопления в материале рассеянных повреждений, приводящих к зарождению и развитию макроскопических трещин до опасных или нежелательных размеров. Вторая группа состоит из предельных состояний, связанных с чрезмерным износом трущихся поверхностей деталей.

Первая группа имеет наибольшее распространение. Это трещины в сосудах и аппаратах, работающих при циклическом изменении давления, это усталостные трещины контактного характера в подшипниках качения и зубчатых передачах. Особенно велика роль усталостных повреждений и развития трещин в деталях, испытывающих вибрационные нагрузки. Физический процесс разрушения состоит из двух стадий. Первая стадия – накопление рассеянных повреждений (0,5...0,9 всего ресурса). Вторая стадия начинается с появления трещины в результате накопления рассеянных повреждений и ее развитие. Накопление рассеянных повреждений зависит почти линейно от наработки и соответствует установившемуся режиму работы оборудования (см. рис. 3.3). Появление трещины соответствует зарождению дефекта (т. А). Скорость развития трещины зависит от ее величины и определяется зависимостью (3.14). Развитие повреждения в соответствии с зависимостью (3.14) экспоненциальное.

Вторая группа состояний связана с давлением в элементах кинематических пар и относительной скоростью скольжения и почти линейно зависит от наработки.

Следовательно, для каждой группы и стадии развития дефекта должна быть своя модель прогнозирования.

Существуют теоретические (расчетные) и экспериментальные методы прогнозирования. Для прогнозирования ресурса при диагностировании используется метод экстраполяции, сущность которого изложена в подразделе 3.2. Процедура экстраполяции при прогнозировании ресурса подобна описанной в подразделе 3.2 процедуре и производится следующим образом:

– составляется временной ряд результатов измерения параметров ТС или их диагностических признаков (параметров вибрации);

- проводится сглаживание числовых параметров временного ряда для исключения случайных составляющих результатов измерения по одному из вышеизложенных методов;
- выявляется тенденция (тренд) развития параметров по коэффициенту корреляции, определенному по формуле (3.2);
- подбирается (вычисляется) аналитическая зависимость параметра от времени отдельно для стадий накопления рассеянных и аварийных повреждений по методу, изложенному в подразделе 3.2;
- находится прогнозируемое значение параметра в некоторый будущий момент времени и сопоставляется с предельным значением этого параметра;
- определяется время очередного диагностирования;
- выявляется погрешность диагностирования и ресурс составной части оборудования;
- при появлении новых данных по параметрам ТС в результате очередного диагностирования ресурс уточняется.

В ряде практических случаев сглаженные зависимости  $F(t)$ , определяемые по формуле (3.1), достаточны для ориентировочного прогнозирования ресурса, например, путём графической экстраполяции сглаженного числового временного ряда. Но в большинстве случаев метод экстраполяции даёт результаты тогда, когда правильно определена форма кривой, отражающей изменение.

Во многих случаях горизонт прогнозирования ресурса относительно мал, например, время прогнозирования совпадает со временем следующего диагностирования объекта. Кроме того, почти линейные зависимости наблюдаются при дефектах в виде износа, а также на первой стадии развития дефектов в виде усталостных разрушений. В этих случаях функция  $y(t)$ , определяемая по формуле (3.3), линеаризуется.

После нахождения коэффициентов  $a$  и  $b$  путём экстраполяции зависимости (3.3) находится для прогнозируемого времени  $t = t_{\Pi}$  величина диагностируемого параметра  $y_{\Pi} = a + b_1 t_{\Pi}$ .

Остаточный ресурс составной части определяется по формуле

$$\tau = \frac{[y] - \tilde{y}_K}{b},$$

где  $[y]$  – предельное значение параметра  $y$ ;

$\tilde{y}$  – значение параметра  $y$  при последнем измерении на сглаженной зависимости.

В простейшем случае для прогнозирования может быть использована линейная экстраполяция. Например, измерив значения сигнала  $y_2$  в момент времени  $t_2$ , можно определить ресурс составной части оборудования:

$$\tau = \frac{([y] - y_2)}{\dot{y}},$$

где  $\tau$  – время работы составной части до отказа;  
 $\dot{y}$  – скорость изменения диагностического параметра;

$$\dot{y} = \frac{(y_2 - y_1)}{(t_2 - t_1)}. \quad (3.15)$$

Ускоренное и аварийное развития усталостных повреждений описываются нелинейным дифференциальным уравнением вида (3.6).

В общем виде  $f(t)$  удобно представить степенным полиномом. Для описания ускоренного развития повреждения до достижения предельного состояния можно ограничиться только первым слагаемым правой части выражения полинома

$$\frac{dy}{dt} = a_1 y, \quad (3.16)$$

где  $a_1$  – постоянный коэффициент.

Интегрированное уравнение (3.16) даёт экспоненциальное увеличение параметра  $y$ :

$$y = y_0 e^{a_1 t}, \quad (3.17)$$

где  $y_0$  – наименьшее значение параметра при  $t = 0$ .

При прогнозировании остаточного ресурса нескольких однотипных машин или нескольких однотипных узлов одного агрегата диагностические признаки ТС  $y_1, \dots, y_e$  являются случайными процессами, математическое ожидание  $m_y(t)$  и дисперсия  $D(y)$  которых изменяются по времени монотонно, чаще всего по степенной зависимости:

$$m_y(t) = K_1 t^a; \quad D(y) = K_2 t^a,$$

где  $K_1, K_2, a$  – постоянные значения, определяемые экспериментально;  
 $t$  – время эксплуатации.

Если среднеквадратическое отклонение фактического изменения параметра от аппроксимирующей степенной функции  $\sigma_z \leq 0,05$ , остаточный ресурс рассчитывается по формуле

$$t_{ocm} = t_k \left[ \left( \frac{y_n}{y(t_k)} \right)^{\frac{1}{a}} - 1 \right],$$

где  $y_n = [y]$  – предельное значение диагностического параметра;

$t_k = t_n - t_i$  – интервал времени между последним и  $i$ -м временем диагностирования;

$y(t_k)$  – разность между текущим и номинальным значениями диагностического параметра.

Из-за непостоянства скорости нарастания дефекта (тренда) периодичность диагностирования переменна. Она уменьшается с увеличением наработки диагностируемой составной части.

Для прогнозирования остаточного ресурса конструкций оборудования единственно приемлемый метод – диагностический, основанный на прогнозировании вибрационного сигнала, являющегося диагностическим признаком технического состояния машины.

В заключение раздела отметим, что прогнозирование развития объектов, явлений, процессов является одной из бурно развивающихся частей системного анализа, применяемого в технике, научных исследованиях, экономике, при изучении биологических и социальных явлений и процессов. Прогнозирование как основа для планирования и принятия решений должно использоваться специалистами различных направлений человеческой деятельности.

## Контрольные вопросы

1. Общие черты методов и этапов прогнозирования.
2. Классификация методов прогнозирования.
3. Закономерности временного ряда: тенденции, сезонность, циклы, переменные и случайные величины.
4. Сущность метода экстраполяции.
5. Способ проверки устойчивости тенденции (тренда) по экспериментальным данным.
6. Методы сглаживая экспериментальной кривой.
7. Элементарные функции, используемые при прогнозировании.
8. Метод определения коэффициентов линейной функции.
9. Сущность экстраполяции с использованием степенных полиномов.
10. Экстраполяция периодических процессов с помощью тригонометрических полиномов.
11. Кривые Перла и Гомперца для прогнозирования развития техники.
12. Характеристики развития параметров машины по логистическим кривым (S-образным функциям).
13. Понятие о поколениях машин.
14. S-образные кривые, полученные из нелинейной модели прогнозирования.
15. Экстраполяция тенденций по огибающим кривым.
16. Сущность корреляционных методов прогнозирования.
17. Сущность регрессионных методов прогнозирования.
18. Прогнозирование на основе анализа патентов и научно-технической информации.



19. Отличительные признаки патентной информации.
20. Методика прогнозирования на основе анализа патентной и научно-технической деятельности.
21. Сущность экспертных методов прогнозирования.
22. Случаи, в которых следует применять экспертные методы.
23. Требования к эксперту.
24. Методы опроса и особенности параметров опроса при экспертных методах.
25. Сущность матричных методов прогнозирования.
26. Методы верификации прогнозирования.
27. Виды ошибок при прогнозировании.
28. Прогнозирование остаточного ресурса машин.
29. Прогнозирование технического уровня и качества машин и оборудования.
30. Понятие о ресурсе и остаточном ресурсе составных частей машин и оборудования.
31. Прогнозирование технического состояния оборудования по результатам диагностирования.
32. Остаточный ресурс оборудования, методы определения.

## 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

### 4.1. Задачи и математические модели оптимизации

Оптимальное техническое решение – это лучшее из всех возможных решений. Слово «оптимальный» происходит от латинского слова *optimus* – наилучший. (Древнеримская богиня плодородия и урожая Óпа одаряет благами, временем и силой всех, кто занимается оптимальным проектированием).

Оптимизация – это процесс, в котором максимизируется количественная характеристика желательного свойства объекта или минимизируется количественная характеристика нежелательного свойства.

Решения человек принимает всегда и во всех сферах своей деятельности. И, конечно, хотелось бы, чтобы эти решения были правильными. Но что такое правильное решение? Оказывается, на этот вопрос ответить не так-то просто. Любая оценка – это сравнение. А сравнивать не с чем. Эталонов правильных решений, к сожалению, нет. Сказать, что решение правильное или неправильное, – это значит дать оценку, которая может оказаться весьма субъективной. Поэтому в дальнейшем не будем говорить о правильных решениях, потому что мы просто не знаем, что это такое. Разговор будем вести об оптимальных решениях. Что же касается оптимального решения, то здесь все четко и определено. Оптимальное решение – это наилучшее решение.

Теория оптимизации – это раздел математики, посвященный изучению экстремальных значений функций, а также их количественному определению.

Стремление к оптимизации – это естественное состояние человека. Человек по своей природе является прирожденным оптимизатором. Он занимается оптимизацией, потому что ему необходимо экономить свои ограниченные запасы энергии, ресурсов, времени. Он оптимизирует, чтобы свести к минимуму продолжительность работы или получить ее максимальный результат. Каждый шаг человека, каждое принимаемое им решение – это зачастую неосознанное, но объективно существующее желание получить оптимальный результат.

Первая задача оптимизации описана в «Энеиде» римского поэта Вергилия (70 – 19 гг. до н. э.). Боги даровали царице Дидоне столько земли, сколько она смогла охватить своим ремнем, сделанным из шкуры быка. Она очертила ремнем полуокружность, концы которой располагались на берегу Средиземного моря, тем самым охватив максимально возможную при заданных условиях площадь суши.

В наше время методы оптимизации эффективно применяются в самых различных областях человеческой деятельности. Особенно значительные успехи достигнуты при проектировании и анализе больших технических систем, прежде всего машин и оборудования, в экономике и организации производства.

Отличие оптимизационного решения от многовариантного при проектировании оборудования заключается в следующем. При вариантных расчетах значение целевой функции является следствием заданных значений величин. При оптимизационном расчете значения искомых величин удовлетворяют всем ограничениям и граничным условиям и являются наилучшими из возможных при эксплуатации оборудования.

В настоящее время для специалиста знание методов оптимизации является столь же необходимым, как знание основ математического анализа, теории механизмов и машин, физики, сопротивления материалов, деталей машин и ряда других курсов, ставших традиционными.

В наиболее общем смысле теория оптимизации представляет собой совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов. Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, поскольку классические функции инженера заключаются в том, чтобы, с одной стороны, проектировать новые, более эффективные и менее дорогостоящие технические системы и, с другой, – разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем.

Эффективность оптимизационных методов, позволяющих осуществить выбор наилучшего варианта без непосредственной проверки всех возможных вариантов, тесно связана с широким использованием достижений в области математики: теории матриц, элементов линейной и нелинейной алгебры и дифференциального исчисления, а также положений математического анализа.

Задачи оптимизации с точки зрения математической постановки относятся к задачам математического программирования и части науки, называемой исследованием операций.

Важным этапом изучения явлений, предметов, процессов является их систематизация. Результатом строгой систематизации является классификация. Классификация осуществляется по нескольким признакам: область применения, содержание задачи, класс математической модели.

Приложение методов оптимизации достаточно широкое:

- проектирование структурных элементов систем и процессов;
- планирование стратегий капитальных вложений;
- определение оптимальных маршрутов движения грузового транспорта;

- дислокация вооруженных сил;
- проектирование составных частей машин и сооружений;
- планирование и анализ функционирования существующих систем;
- инженерный анализ и обработка информации;
- управление динамическими системами.

В настоящем пособии из всего обширного круга задач, решаемых методами оптимизации, рассматриваются только задачи оптимизации технических решений, связанных с обеспечением производственной деятельности промышленных предприятий. Обеспечение производства включает организацию и управление, проектирование изделий, разработку технологических процессов (в табл. 4.1).

Таблица 4.1

Области применения задач оптимизации

Организация и управление	Проектирование, исследование	Разработка технологических процессов
Оптимизация распределения ресурсов: сырьевых, трудовых (кадровых), энергетических, основных фондов и т. д.	Оптимизация параметров объекта проектирования, Оптимизация структуры объекта проектирования, Оптимизация функционирования	Оптимизация маршрута изготовления изделия, Оптимизация параметров технологических процессов

Задачи организации и управления включают в себя оптимизацию объема и характера выпускаемой продукции, снабжения и сбыта, маркетинга, распределения и использования станочного парка, распределения людей по рабочим местам и т.п. Все эти задачи можно отнести к ресурсным, к классу задач распределения ресурсов.

Объекты проектирования характеризуются устройством и действием. Устройство определяется структурой и параметрами. Действие характеризуется процессом функционирования. Необходимость оптимизации возникает при решении всех трех типов вопросов.

Технологический процесс определяется последовательностью работ, которые обеспечивают превращение сырья в готовую продукцию. Такую последовательность работ называют маршрутом. Каждая операция, входящая в маршрут, характеризуется режимом обработки. Задачи, требующие оптимизационного решения, могут быть и при выборе маршрута и при определении параметров операции.

Для решения рассмотренных задач используются различные математические модели, которые классифицируются по следующим элементам: исходным данным, искомым переменным, зависимостям, описывающим целевую функцию и ограничения. Исходные данные, которые заданы определенными величинами, называют детерминированными.

Исходные данные, например амплитуды колебаний вращающегося ротора бумагоделательной машины, зависят от ряда случайных факторов. Такие исходные данные называют случайными величинами.

Переменные могут быть непрерывными и дискретными. Непрерывными называются такие величины, которые в заданном интервале могут принимать любые значения, например, масса 1 м<sup>2</sup> бумаги, скорость бумагоделательной машины и т.д. Дискретными, или целочисленными, называют такие величины, которые могут принимать только целые значения, например количество тракторов.

Зависимости между переменными могут быть линейными и нелинейными. В линейные зависимости переменные входят в первой степени, в них нет произведений переменных. В нелинейных зависимостях переменные имеют разные степени, могут быть трансцендентными или входят в виде произведений. Структура элементов модели представлена на рис. 4.1.

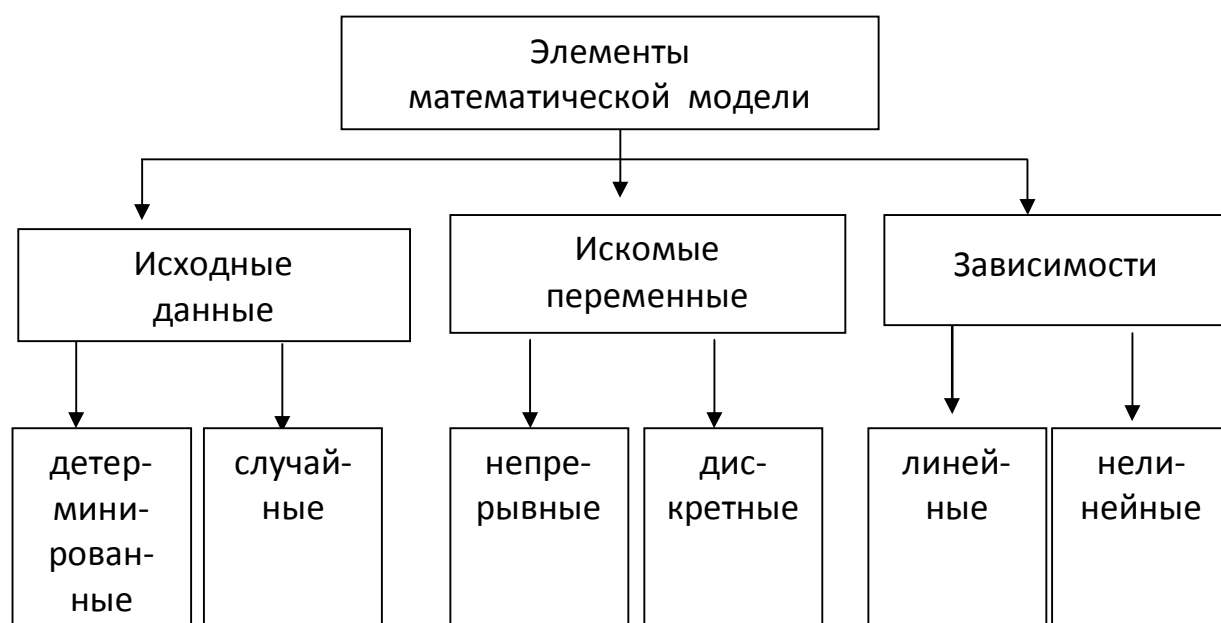


Рис. 4.1. Структура элементов математических моделей оптимизации

Сочетание различных элементов модели требует различных методов решения оптимизационных задач. Классы задач оптимизации приведены в табл. 4.2. Задачи оптимизации подразделяются также по форме, по наличию ограничений, по виду переменных и по другим признакам (рис. 4.2). По форме целевой функции оптимизация связана с определением максимума или минимума функции. По наличию ограничений могут быть задачи условной и безусловной оптимизации.

Задача условной оптимизации – задача с ограничениями. Задача, в которой нет ограничений, называется задачей безусловной оптимизации.

Таблица 4.2

Классы задач оптимизации

Исходные данные	Переменные	Зависимости	Задачи
Детерминированные	Непрерывные	Линейная	Линейно программируемые (ЛП)
	Целочисленные	Линейная	Целочисленные программируемые (ЦЧП)
	Непрерывные, целочисленные	Нелинейная	Нелинейно программируемые (НЛП)
Случайные	Непрерывные	Линейная	Стохастически программируемые (СП)

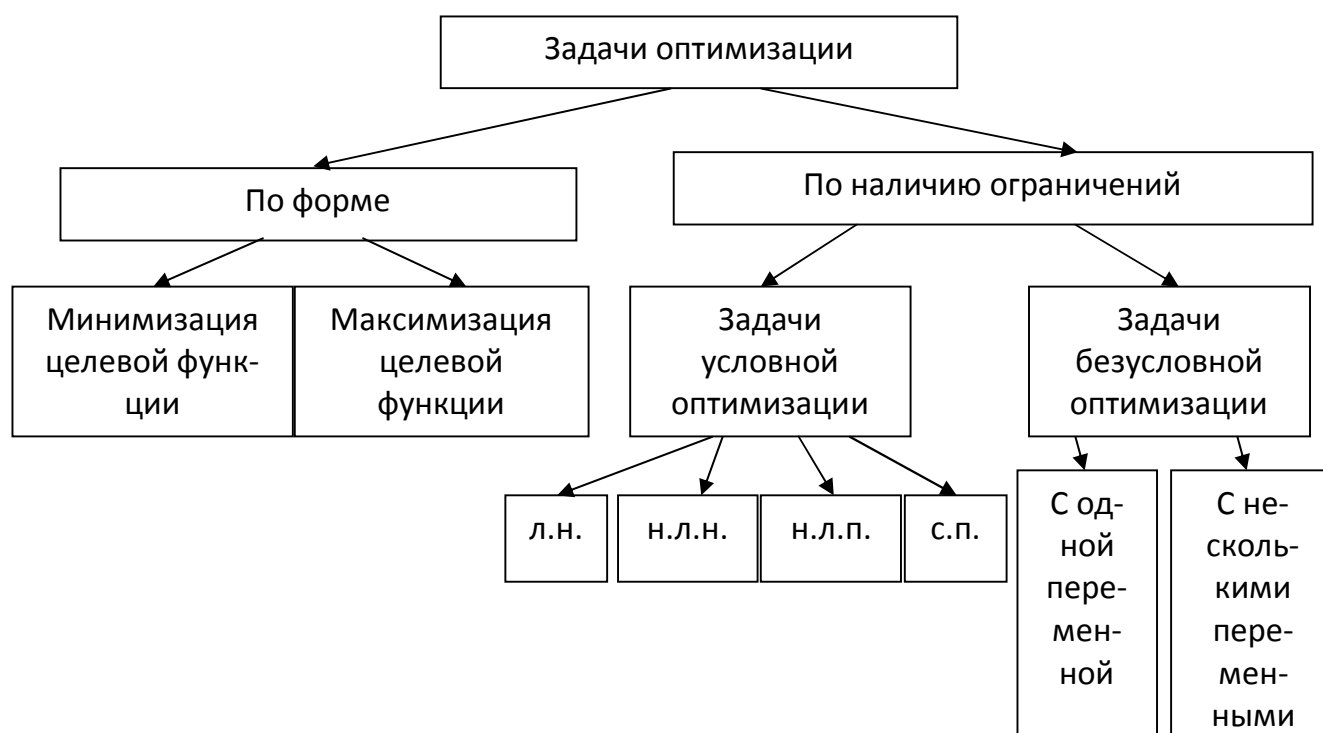


Рис. 4.2. Классификация задач оптимизации

Задачи можно классифицировать в соответствии с видом целевой функции и ограничений. Задачи без ограничений, в которых исходный параметр  $x$  представляет собой одномерный вектор, называются задачами с одной переменной и составляют простейший, но вместе с тем весьма важный подкласс оптимизационных задач. Задачи с ограничениями, которые содержат только линейные функции вектора непрерывных переменных  $x$ , называются задачами линейного программирования; в задачах целочисленного программирования компоненты вектора  $x$  должны принимать только целые значения.

Задачи с нелинейной целевой функцией называются задачами нелинейного программирования. Эти задачи можно классифицировать на основе структурных особенностей нелинейных целевых функций. Если  $f(x)$  – квадратическая функция, то присутствует задача квадратического программирования; если  $f(x)$  – отношение линейных функций, то имеется задача дробно-линейного программирования и т. д.

## **4.2. Методологические основы оптимизации**

### ***Постановка задачи оптимизации***

Первым и наиболее важным этапом оптимизации технических решений является постановка задачи оптимизации. Корректная постановка задачи служит ключом к успеху оптимизационного исследования и ассоциируется в большей степени с искусством, нежели с точной наукой. Искусство постановки задачи постигается в практической деятельности на примерах успешно реализованных разработок и основывается на четком представлении преимуществ, недостатков и специфических особенностей различных методов оптимизации. Считается, что на постановку задачи оптимизации специалист затрачивает 60 % времени, а на решение задачи только 40 %. Следует также заметить, что далеко не все решения задач оптимизируются.

Последовательность процесса постановки задачи инженерной оптимизации:

- 1) установление границ подлежащей оптимизации инженерной системы;
- 2) определение количественного критерия, на основе которого можно провести анализ вариантов с целью выявления наилучшего;
- 3) выбор внутрисистемных переменных для определения характеристик и идентификации вариантов;
- 4) определение ограничений (зависимостей между переменными);
- 5) определение граничных условий, показывающих предельно допустимые значения искомых переменных;
- 6) построение оптимизационной модели, отражающей взаимосвязи между переменными и представляющей собой некоторый набор уравнений и неравенств.

Эта последовательность действий и составляет содержание процесса постановки задачи инженерной оптимизации.

### ***Установление границ системы***

Прежде, чем приступить к оптимизационному исследованию, важно четко определить границы изучаемой системы. Система предстает как некоторая изолированная часть реального мира. При проведении анализа

обычно предполагается, что взаимосвязи между системой и внешней средой зафиксированы на некотором выбранном уровне представления.

Границы системы задаются пределами, отделяющими систему от внешней среды. Поскольку между системой и внешней средой или над системой имеются определенные связи, установление границ системы является первым шагом в процессе приближенного описания реальной системы. Расширение границ системы повышает разрядность и сложность многокомпонентной системы и, следовательно, в значительной мере затрудняет ее анализ. Очевидно, что в инженерной практике следует, насколько это возможно, стремиться к разбиению больших сложных систем на относительно небольшие подсистемы, которые можно изучать по отдельности. Однако при этом необходимо иметь уверенность в том, что такая декомпозиция не приведет к излишнему упрощению реальной ситуации. Следует иметь в виду, что ошибка в выборе границ системы может привести к субоптимизации, при которой оптимальное решение для одной составной части системы приводит к неоптимальному решению всей системы.

Для примера рассмотрим задачу проектирования спиральной пружины минимальной массы, входящей в состав виброизолятора машинного агрегата и работающей на сжатие под действием осевой нагрузки (рис. 4.3.).

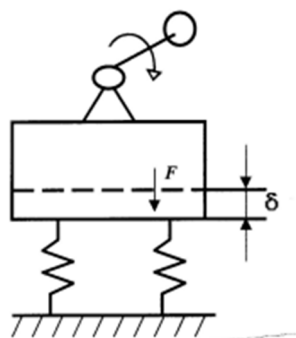


Рис. 4.3. Схема виброизолированного агрегата

В данном случае границы системы определяются пружиной и приложенной к ней нагрузкой. Можно расширить границы, например, до виброизолятора, в состав которого входит эта пружина, или до всего машинного агрегата, учитывая таким образом действие на пружину еще ряда дополнительных факторов.

### **Определение первичного количественного критерия**

Принимающий решение должен абсолютно точно представлять, в чем заключается оптимальность принимаемого решения, т.е. по какому критерию (от греч. *criterion* – мерило, оценка) принимаемое решение должно быть оптимально. Критерий часто называют целевой функцией, а в математических работах - функционалом.

В качестве критерия, на основе которого можно оценить техническое решение, могут быть экономические, технологические или иные факторы, например капитальные затраты, издержки в единицу времени, чистая прибыль в единицу времени, продолжительность процесса производства изделия, минимизация потребляемой энергии, минимизация массы изделия и др.

Важно отметить, что только один критерий может использоваться при определении оптимума, так как невозможно получить решение, кото-



рое одновременно обеспечивает оптимум по нескольким критериям, например невозможно обеспечить одновременно минимум затрат на изготовление, максимум надежности, минимум потребляемой энергии и минимум массы изделия.

При определении оптимума обычно принимают один из критериев, который считается первичным, остальные критерии являются вторичными. Первичный критерий используется при оптимизации как характеристическая мера, а вторичные критерии порождают ограничения оптимизационной задачи, устанавливающие диапазоны изменения соответствующих показателей от минимальных до максимальных приемлемых значений. Так, в рассматриваемом примере в качестве целевой функции берется по заданию масса пружины, которая должна быть минимальна. Хотя за целевую функцию могли быть приняты критерии прочности, предотвращение резонанса и др.

Целевая функция записывается в виде

$$m_{np} = \frac{N\pi^2 Dd^2 \rho}{4} \longrightarrow \min, \quad (4.1)$$

где  $D$  – средний диаметр пружины;

$d$  – диаметр проволоки;

$N$  – число витков;

$\rho$  – плотность материала пружины.

Остальные критерии будут ограничениями.

### **Выбор внутрисистемных переменных**

Переменные должны адекватно описывать допустимые проекты или условия функционирования системы. Переменные выбираются таким образом, чтобы все важнейшие технико-экономические решения нашли отражение в формулировке задачи. Очень важно ввести в рассмотрение все основные переменные, но не менее важно «не перегружать» задачу большим количеством мелких, несущественных переменных, т. е. при выборе независимых переменных следует рассматривать только те переменные, которые оказывают существенное влияние на характеристический критерий, выбранный для анализа сложной системы.

При выборе независимых переменных учитывают различие между переменными, значения которых могут изменяться в достаточно широком диапазоне, и переменными, значения которых фиксированы и определяются внешними факторами. Последние могут предполагаться постоянными и подверженными флуктуациям вследствие воздействия внешних или неконтролируемых факторов.

Исключение возможных альтернатив может привести к получению субоптимальных решений. Например, при проектировании аппарата можно

рассматривать его высоту, диаметр, толщину стенки как независимые переменные, но если исключить возможность использования в аппарате, например, компрессора для повышения рабочего давления, то получится решение весьма низкого качества, так как не учтена стоимость компрессора.

### **Определение ограничений и граничных условий**

Как уже отмечалось, вторичные критерии при определении оптимума представляются в виде ограничений. В рассматриваемом примере критериями, представленными в виде ограничений, являются:

1) предотвращение разрушения материала

$$\tau \leq [\tau],$$

где  $\tau$  – касательные напряжения (напряжения сдвига) в проволоке;

$[\tau]$  – допустимое касательное напряжение;

2) предотвращение резонанса в пружине

$$\omega - \omega_0 > 0,$$

где  $\omega$  – частота динамических воздействий на пружину;

$\omega_0$  – собственная частота колебаний пружины.

То есть пружина должна работать в дорезонансном режиме.

Граничные условия показывают предельно допустимые значения искомых переменных. В общем случае граничные условия могут быть двухсторонними:  $a_i \leq x_i \leq b_i$ .

Возможны частные случаи. В технических расчетах искомые величины бывают положительными или равными нулю, т.е. накладывается требование неотрицательных перемещений,  $x_i \geq 0$ . Так, в нашем примере (см. рис. 4.3) будут следующие граничные условия: диаметр проволоки  $d$ , диаметр спирали  $D$ , число витков  $N$  должны быть неотрицательны,

$$d \geq 0; \quad D \geq 0; \quad N \geq 0.$$

Итак, граничные условия показывают предельно допустимые значения искомых переменных. Ограничения – это зависимости между переменными, которые могут быть детерминированными и статистическими. Значения переменных, удовлетворяющих граничным условиям и ограничениям, называют допустимым решением задачи.

### **Построение модели**

На завершающем этапе постановки задачи строится модель, описывающая взаимосвязи между переменными задачи и отражающая влияние независимых переменных на степень достижения цели, определяемой целевой функцией.

Моделью называется упрощенное математическое представление системы. Модель представляет некоторый набор уравнений и неравенств, которые определяют взаимосвязь между переменными системы и ограничивают область допустимых значений этих переменных.

Элементы модели содержат всю информацию, которая используется при расчете проекта или прогнозировании характеристик инженерной системы. Очевидно, что процесс построения модели является весьма трудоемким и требует четкого понимания специфических особенностей рассматриваемой системы. Существует даже такое мнение, что составление модели – это искусство, творчество. До какого-то уровня научить этому можно, но не более того. Там, где творчество, там важны личные качества, знания, способности. Такие качества всегда ценились очень высоко. Ведь, если двое смотрят на одно и то же, это не значит, что оба видят одно и то же. И утверждение древних греков «Если двое делают одно и то же, это не значит, что получится одно и то же», в полной мере относится к составлению математических моделей.

Заметим, что в задачу могут включаться требования, которые оказываются противоречивыми, невыполнимыми. Такие задачи называются несовместимыми, несбалансированными, и их необходимо выявлять на стадии постановки задачи оптимизации.

Математическая постановка задачи оптимизации в общем случае включает три составляющие: целевую функцию (ц.ф.), ограничения (огр.) и граничные условия (гр.у.).

Математическая модель оптимизационной задачи выглядит в общем случае в виде:

$$\begin{aligned} F=f(x_i) &\rightarrow \max(\min) && \text{ц.ф.} \\ g_i(x_i) &= 0 && \text{огр.} \\ a_i \leq x_i \leq b_i &&& \text{гр.у.} \\ i &= 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4.2)$$

Применительно к рассматриваемой задаче математическая модель оптимизации параметров пружины имеет вид:

$$\begin{aligned} m_{np} &= \frac{N\pi^2 D d^2 \rho}{4} \rightarrow \min; && \text{ц.ф.} \\ \sigma &\leq [\sigma]; \omega - \omega_0 \neq 0; && \text{огр.} \\ D \geq 0; D \geq 0; N \geq 0. &&& \text{гр.у.} \end{aligned}$$

### **Примеры постановки оптимизационных задач**

Рассмотрим несколько примеров постановки различных задач оптимизации, касающихся вопросов управления, проектирования и разработки технологических процессов.

*Пример 1.* Постановка задачи оптимизации при проектировании консольной балки, приваренной к жесткой опоре. Определение границ

системы тривиально. Независимыми переменными являются размеры  $h$ ,  $l$ ,  $t$  и  $b$  (рис. 4.4). Постоянные величины –  $F$ ,  $L$ , материал балки и швов.

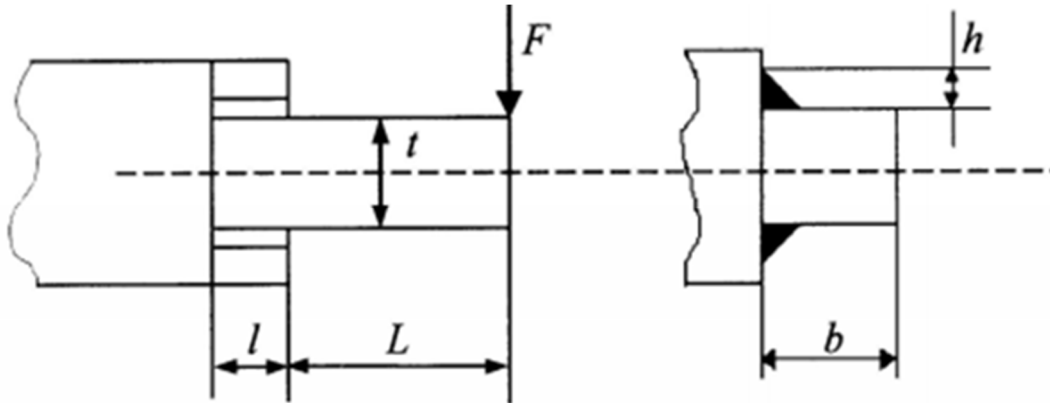


Рис. 4.4. Нагруженная консольная балка

Для составления модели системы необходимо записать соотношения в виде неравенств, обеспечивающих функционирование системы. Такими неравенствами являются:

- касательные напряжения в сварном шве:  $\tau(x) \leq [\tau]$ ;
- нормальные напряжения в балке:  $\sigma(x) \leq [\sigma]$ ;
- критическая нагрузка, приводящая к потере устойчивости балки:  $t/b \leq [K_{ycm}]$ ;
- прогиб балки:  $\delta(x) \leq [\delta]$ ;
- ширина шва, которая не может быть больше толщины балки:  $b - h_1 \geq 0$ ;
- требование неотрицательности размеров  $l$  и  $t$ :  $l \geq 0$ ;  $t \geq 0$ ;
- учет пороговых минимальных размеров шва  $h_{min}$ :  $h - h_{min} \geq 0$ .

Таким образом, оптимизационная задача включает целевую функцию и сложную систему неравенств.

**Пример 2.** Постановка задачи оптимизации штата лаборатории диагностики. В лаборатории диагностики работают инженеры и слесари-диагносты. Дневная норма лаборатории – 1800 точек контроля. Инженер по диагностике контролирует 25 точек в час и ошибается в 2 % случаев. Слесарь-диагност проверяет 15 точек в час, его точность составляет 95 %. Заработная плата инженера равна 80 руб./час, слесаря – 60 руб./час. При каждой ошибке предприятие несет убытки в 100 руб.

Необходимо определить оптимальный состав службы диагностики.

Фирма может использовать 8 инженеров и 10 слесарей. Расходы на диагностику складываются из зарплаты и убытков при ошибках.

Расходы на одного инженера  $40 + 20 \times 25 \times 0,02 = 50$  руб./час.

Расходы на одного слесаря  $30 + 20 \times 15 \times 0,05 = 45$  руб./час.

Целевая функция, выражающая ежедневные расходы,

$$Z = 8(50x_1 + 45x_2) = 400x_1 + 360x_2 \rightarrow \min,$$

где  $x_1$  – число инженеров,  $x_1 \leq 8$

$x_2$  – число слесарей,  $x_2 \leq 10$ .

Ежедневно необходимо контролировать не менее 1800 точек. Поэтому выполняется неравенство:

$$8 \times 25x_1 + 8 \times 15x_2 \geq 1800 \quad \text{или} \quad 5x_1 + 3x_2 \geq 45.$$

Формулировка задачи линейного программирования (л.п.) – минимизировать  $Z = 400x_1 + 360x_2$  при ограничениях:

$$0 \leq x_1 \leq 8; \quad 0 \leq x_2 \leq 10; \quad 5x_1 + 3x_2 \geq 45.$$

### 4.3. Методы безусловной оптимизации технических решений

#### *Свойства функции одной переменной*

Пусть  $f(x)$  – целевая функция,  $S$  – область допустимых значений.

$$f(x) = x^3 + 2x^2 - x + 3 \quad \text{для всех } x \in S = \{-5 \leq x \leq 5\}.$$

Непрерывная функция – функция, обладающая свойством непрерывности в каждой точке  $x$ , принадлежащей области допустимых значений. Виды функций даны на рис. 4.5.

Функция  $f(x)$  является монотонной, если для двух произвольных точек  $x_1$  и  $x_2$  при  $x_1 \leq x_2$  выполняется одно из следующих неравенств:

$f(x_1) \leq f(x_2)$  – монотонно возрастающая функция;

$f(x_1) \geq f(x_2)$  – монотонно убывающая функция.

Функция  $f(x)$  является унимодальной на отрезке  $a < x < b$  в том случае, если она монотонная по обе стороны от единственной на интервале оптимальной точки  $x^*$ .

Функция  $f(x)$ , определенная на множестве  $S$ , достигает своего глобального минимума в точке  $x_{\Gamma}$  в том и только в том случае, если

$$f(x_{\Gamma}) \leq f(x) \quad \text{для всех } x \in S.$$

Функция  $f(x)$ , определенная на множестве  $S$ , имеет локальный минимум (относительный минимум) в точке  $x_{\Gamma} \in S$  в том и только в том случае, если  $f(x_{\Gamma}) \leq f(x)$  для всех  $x$ , удаленных от  $x_{\Gamma}$  на расстояние, меньше  $\varepsilon$ .

Аналогичное определение можно получить для глобального и локального максимумов путем замены знака неравенства на противоположный.

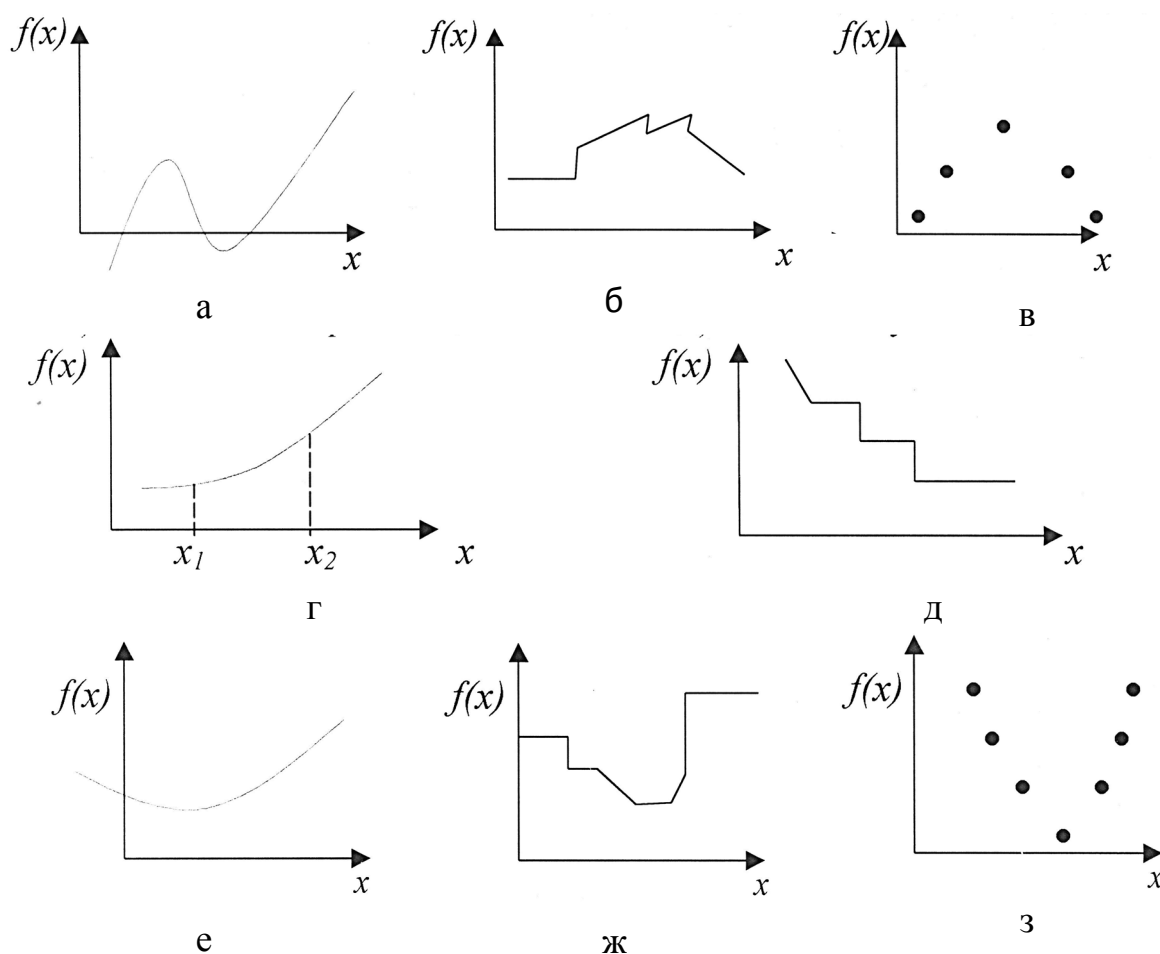


Рис. 4.5. Виды функций: а – непрерывная; б – разрывная; в – дискретная; г – монотонно возрастающая; д – монотонно убывающая; е – непрерывная унимодальная; ж – разрывная унимодальная; з – дискретная унимодальная

Если функция унимодальна, то локальный оптимум автоматически является глобальным. Если функция не является унимодальной, то возможно наличие нескольких оптимумов. Глобальные оптимумы можно определить путем нахождения всех локальных оптимумов и выбора наименьшего (минимум) или наибольшего (максимум) из них (рис. 4.6).

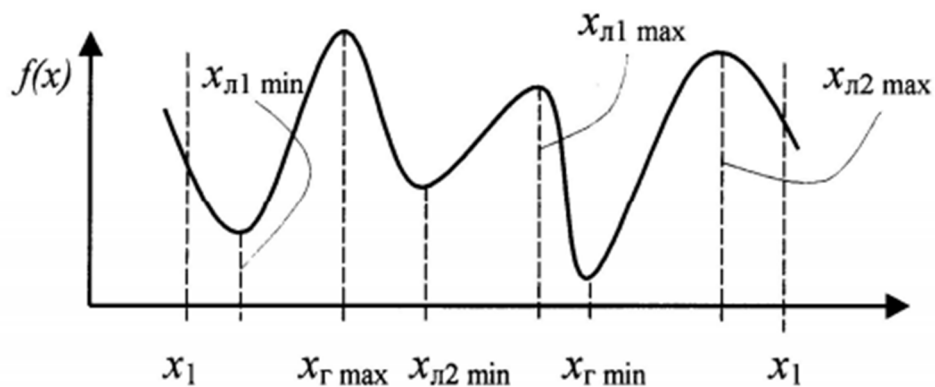


Рис. 4.6. Локальные и глобальные оптимумы

Для оптимизации функции одной переменной используется множество алгоритмов наиболее часто применяемых методов: правило исключения интервалов, методы полиномиальной аппроксимации и методы с использованием анализа производных. Все методы одномерной оптимизации основаны на предположении, что исследуемая целевая функция в допустимой области обладает свойством унимодальности, так как для унимодальной функции  $f(x)$  сравнение значений  $f(t)$  в двух различных точках интервала поиска позволяет определить, в какой из заданных двумя указанными точками подынтервалов точки оптимума отсутствуют.

**Правило исключения интервалов.** Пусть функция  $f(x)$  унимодальна на отрезке  $[a, b]$ , а ее минимум достигается в точке  $x^*$ . Рассмотрим точки  $x_1$  и  $x_2$ , расположенные  $a \in x_1 < x_2 \in b$ .

Если  $f(x_1) \in f(x_2)$ , то точка минимума  $f(x)$  не лежит в интервале  $(a, x_1)$ .

Если  $f(x_1) \in f(x_2)$ , то точка минимума  $f(x)$  не лежит в интервале  $(b, x_2)$ .

Это правило позволяет реализовать процедуру поиска путем последовательного исключения частей исходного ограниченного интервала. Поиск завершается тогда, когда оставшийся подынтервал уменьшается до достаточно малых размеров.

Сущность метода полиномиальной аппроксимации заключается в том, что непрерывную функцию в некотором интервале можно аппроксимировать полиномом достаточно высокого порядка. Следовательно, если функция унимодальна и найден полином, который достаточно точно ее аппроксимирует, то координаты точки оптимума функции можно оценить путем вычисления координаты точки оптимума полинома.

Методы с использованием анализа производных заключаются в следующем: необходимыми условиями того, что точка  $x^*$  является точкой локального минимума (максимума) дважды дифференцируемой функции  $f(x)$  на интервале  $(a, b)$ , являются следующие отношения:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^*} = 0; \quad \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x^*} \geq 0 \quad (\leq 0). \quad (4.4)$$

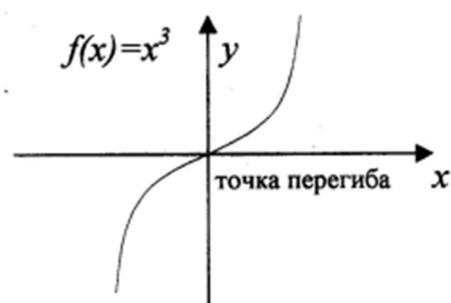


Рис. 4.7. Функция с точкой перегиба

Условия (4.4) являются необходимыми, но недостаточными, так как они характерны не только для точек оптимума, но и для точек перегиба (рис. 4.7).

Пусть в точке  $x^*$  первые  $(n - 1)$  производные функции обращаются в нуль, а производные порядка  $n$  отличаются от нуля.

Если  $n$  – нечетное, то  $x^*$  – точка перегиба.

Если  $n$  – четное, то  $x^*$  – точка локального оптимума, причем если производная положительна, то  $x^*$  – точка локального минимума, если отрицательна, то  $x^*$  – точка локального максимума.

Пусть имеется функция, определенная на всей действительной оси:

$$f(x) = 5x^6 - 36x^5 + 82,5x^4 - 60x^3 + 36.$$

Первая производная этой функции

$$\frac{df}{dx} = 30x^5 - 180x^4 + 330x^3 - 180x^2 = 30x^2(x-1)(x-2)(x-3) = 0.$$

Корни этого уравнения (стационарные точки)

$$x_1 = 0; x_2 = 1; x_3 = 3; x_4 = 4.$$

Вторая производная функции

$$\frac{d^2 f}{dx^2} = 150x^4 - 720x^3 + 990x^2 - 360x.$$

Значения функции и ее второй производной в стационарных точках даны в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Функция и ее производные

$x$	$f(x)$	$f(x)/dx^2$
1	36	0
2	27,4	60
3	44	-120
4	5,5	540

Из приведенного решения следует, что  $x = 1,3$  – точка локального минимума,  $x = 2$  – точка локального максимума.

Для идентификации точки  $x = 0$  необходимо взять третью производную:

$$\frac{d^3 f}{dx^3} = 600x^3 - 2160x^2 + 1980x - 360. \quad \text{При } x=0 \quad \frac{d^3 f}{dx^3} = -360.$$

Так как третья производная в точке  $x = 0$  отлична от нуля и имеет нечетный порядок, точка  $x = 0$  является не точкой оптимума, а точкой перегиба. Следовательно, глобальный минимум функции  $f_{\min} = 5,5$ , глобальный максимум  $f_{\max} = 44$ .

Если функция имеет ограничения в интервале  $[a, b]$ , то определяются также значения этой функции на границах этих интервалов.



Несмотря на то, что безусловная оптимизация функции одной переменной – это наиболее простой тип оптимизационных задач, она занимает центральное место в теории оптимизации как с теоретической, так и с практической точек зрения. Это связано с тем, что задачи однопараметрической оптимизации достаточно часто встречаются в инженерной практике и, кроме того, находят свое применение при реализации более сложных итеративных процедур многопараметрической оптимизации.

### **Безусловная многопараметрическая оптимизация**

Методы безусловной оптимизации функции многих переменных отличаются относительно высоким уровнем развития по сравнению с другими методами нелинейного программирования. К ним относятся методы прямого поиска, основанные на вычислении только значений целевой функции, методы, в которых используются значения первых и вторых производных.

Методы прямого поиска приемлемы лишь для исследования непрерывных циклоидальных функций. Применяются следующие методы прямого поиска:

- эвристические, построенные на интуитивных геометрических представлениях;
- поиск по комплексу;
- по методу Хука–Дживса;
- теоретические, основанные на функционалистических математических направлениях;
- метод сопряжения направлений Пауэлла.

Особенности методов прямого поиска:

- относительная простота соответствующих вычислительных процедур, которые быстро реализуются и легко корректируются;
- не требуют явного выражения целевой функции в аналитическом виде;
- могут требовать более значительных затрат времени по сравнению с методами, основанными на производных.

Рассмотрим применение метода производных при безусловной многопараметрической оптимизации.

В тех случаях, когда целевая функция есть функция двух переменных  $F = f(x_1, x_2) \rightarrow \min$ , находятся частные производные и приравняются к нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial x_2} = 0. \quad (4.5)$$

Корни системы уравнений, образованных частными производными, будут координатами оптимума функции.

Условие (4.5) можно записать в виде

$$\sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2} = 0.$$

Если целевая функция является функцией  $n$  переменных

$$F=f(x_1; x_2; x_3; \dots, x_n) \rightarrow \min,$$

то эта функция будет иметь оптимум в точке, которая находится в результате решения системы уравнений

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial x_2} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial F}{\partial x_n} = 0,$$

или в краткой записи

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2} = 0. \quad (4.6)$$

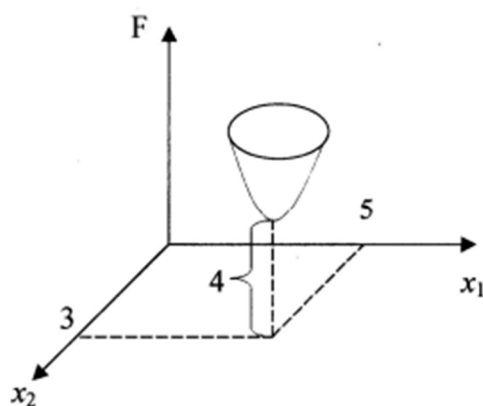
Рассмотрим пример. Найти минимум функции двух переменных (рис. 4.8)

$$F = \frac{(x_1 - 5)^2}{2} + \frac{(x_2 - 3)^2}{3} + 4. \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = \frac{2(x_1 - 5)}{2} = 0; \quad x_1 = 5;$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = \frac{2(x_2 - 3)}{3} = 0; \quad x_2 = 3;$$

$$F_{\min} = \frac{(x_1 - 5)^2}{2} + \frac{(x_2 - 3)^2}{3} + 4 = \frac{5 - 5}{2} + \frac{3 - 3}{3} + 4 = 4.$$



Применение аналитических методов решений задач оптимизации весьма ограничено.

Рис. 4.8. График функции (4.7)

## 4.4. Линейное программирование

Задачами линейного программирования называются оптимизационные задачи, в которых ограничения представляются в виде равенств или неравенств и целевая функция линейна. Это наиболее часто применяемый метод решения оптимизационных задач, особенно в экономике и управлении.

Имеется целый ряд различных методов линейного программирования; одни являются специализированными, другие носят общий характер. В пособии рассматривается два метода общего назначения: метод графического линейного программирования и симплексный метод. Метод графического линейного программирования нагляден и прост, но ограничен только задачами с двумя переменными. Симплексный метод не имеет графической наглядности, но может быть применен к задачам, содержащим более двух переменных.

### ***Графический метод линейного программирования***

Графический метод линейного программирования отображает ограничения в виде графиков и определяет область, которая удовлетворяет всем ограничениям. Эта область называется областью возможных решений. Затем выстраивается целевая функция и определяется оптимальная точка в области возможных решений. Координаты точки могут быть определены непосредственно по графику. Если в задаче существует оптимальное решение, то по крайней мере одна из вершин допустимой области представляет оптимальное решение, которое можно найти путем целенаправленного перебора каждого числа ее вершин.

Порядок решения оптимизационной задачи:

- 1) поставить задачу оптимизации, завершающейся математической моделью оптимизации;
- 2) построить на графике ограничения;
- 3) определить область возможных решений;
- 4) построить на графике целевую функцию;
- 5) найти оптимальное решение.

Графическое решение задачи рассмотрим на нескольких примерах.

**Пример 1.** На производство двух изделий на станке выделено 12 часов времени. Изделие 1 требует 1 час на изготовление и 4 кг материала и приносит прибыль 4 руб. с единицы. На изготовление изделия 2 требуется 3 часа и 3 кг материала, прибыль 5 руб. с единицы. Определить, какое количество каждого изделия следует произвести для обеспечения максимальной прибыли, если известна имеющаяся масса материала 24 кг.

**Постановка задачи.** Обозначим:  $x_1$  и  $x_2$  количество первого и второго изделий. Целевая функция:  $Z = 4x_1 + 5x_2 \rightarrow \max$ . Ограничение по максимальному времени 12 часов:  $x_1 + 3x_2 \leq 12$ . Ограничение по материалу:  $4x_1 + 3x_2 \leq 24$ . Требование неотрицательности:  $x_1 \geq 0$ ;  $x_2 \geq 0$ . Математическая модель выглядит следующим образом:  $Z = 4x_1 + 5x_2 \rightarrow \max$ ;  $x_1 + 3x_2 \leq 12$ ;  $4x_1 + 3x_2 \leq 24$ ;  $x_1 \geq 0$ ;  $x_2 \geq 0$ .

**Построение графика ограничений.** Процедура построения графика ограничений:

- заменить знаки неравенства знаками равенства для преобразования ограничений в уравнения прямых линий:  $x_1 + 3x_2 = 12$ ;  $4x_1 + 3x_2 = 24$ ;
- провести прямые линии на графике в осях координат  $x_1 - x_2$ ;
- подставить  $x_1 = 0$  и  $x_2 = 0$ ;
- ограничить область возможных решений первым сектором;
- заштриховать область, которая удовлетворяет ограничениям.

Целевая функция – это семейство параллельных линий на графике. Каждая из них представляет различное значение прибыли, но каждая линия в отдельности отражает значения  $x_1$  и  $x_2$ , дающие одинаковую прибыль. На графике (рис. 4.9) показаны линии:  $4x_1 + 5x_2 = 20$ ;  $4x_1 + 5x_2 = 40$  и  $4x_1 + 5x_2 = 60$ . Линии  $4x_1 + 5x_2 = 60$  и  $4x_1 + 5x_2 = 40$  лежат за пределами возможных решений и не могут быть оптимальными решениями проблемы.

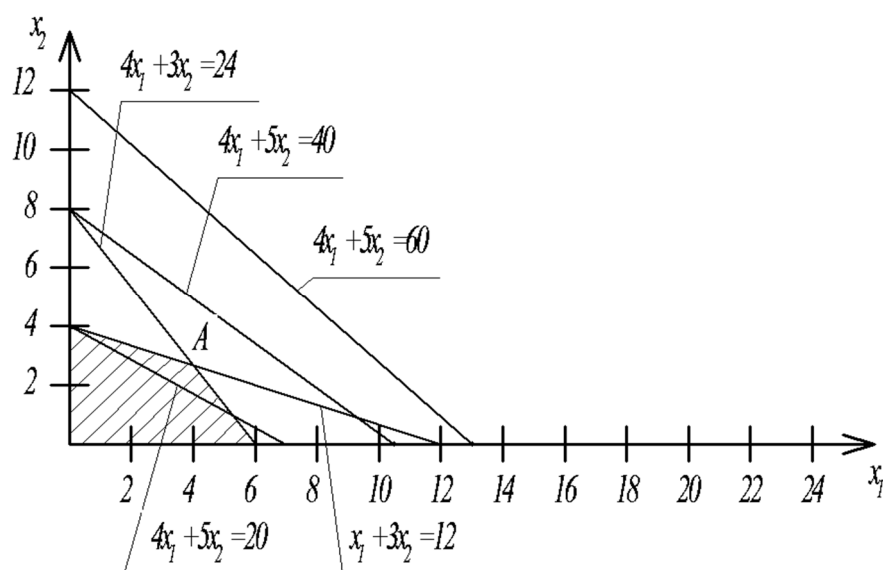


Рис. 4.9. Графический метод оптимизации (пример 1)

Линия  $4x_1 + 5x_2 = 20$  имеет точки, лежащие в пределах области возможных решений, но очевидно, что они не отражают максимальной прибыли. Прибыль увеличивается по мере удаления от начала координат и достигает максимального значения в точке A пересечения двух ограничений. Координаты точки пересечения ограничений определяются из совместного решения уравнений ограничений, которые имеют следующий математический вид:

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 12 \\ 24 \end{vmatrix},$$

отсюда  $x_1 = \frac{12 \cdot 3 - 24 \cdot 3}{1 \cdot 3 - 4 \cdot 3} = 4$ ;  $x_2 = \frac{1 \cdot 24 - 4 \cdot 12}{1 \cdot 3 - 4 \cdot 3} = \frac{8}{3}$ .

Подставляя эти значения в целевую функцию, получим максимальную прибыль:

$$4 \cdot 4 + 5 \frac{8}{3} = 29,35 \text{ руб.}$$

Область возможных решений в графическом линейном программировании представляет собой многоугольник. Решение любой задачи будет находиться в одной из узловых точек этого многоугольника. Оптимальное значение целевой функции определяется по наибольшему значению в этих узловых точках.

Задачи графической минимизации похожи на задачи максимизации, но область возможных решений находится вне многоугольника, а не внутри его.

В *примере 2* приведено решение оптимизационной задачи графическим методом, рассмотренной ранее при определении штата лаборатории.

Математическая модель оптимизации имеет вид

$$Z = 40x_1 + 36x_2 \rightarrow \min$$

при ограничениях  $0 \leq x_1 \leq 8$ ;  $0 \leq x_2 \leq 10$ ;  $5x_1 + 3x_2 \geq 45$ .

Область допустимых решений представим графически (рис. 4.10). Заштрихована область возможных положений минимума. Для нахождения точки минимума приведем значение функции при  $Z = 6000$ ,  $5000$ . Минимальное значение функции  $Z = 3800$  будет в точке  $A$  с координатами  $x_1 = 8$ ,  $x_2 = 5/3$ .

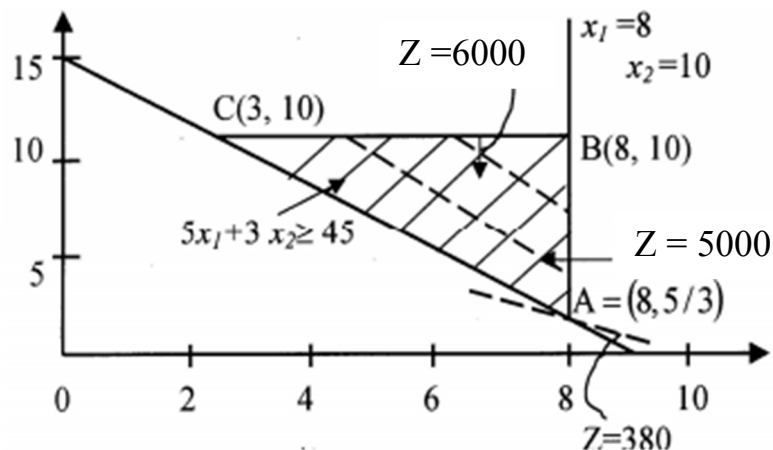


Рис. 4.10. Графический метод оптимизации (пример 2)

Если в задаче линейного программирования существует оптимальное решение, то по крайней мере одна из вершин допустимой области представляет собой оптимальное решение, находящееся в вершине допустимой области. Оно определяется не среди бесконечного множества решений, расположенных в области допустимых значений (в треугольнике АСВ), а путем перебора конечного числа вершин (в точке А, В и С).

Для рассматриваемой задачи:  $Z_A = 3800$ ,  $Z_C = 4800$ ,  $Z_B = 7800$  в точке А – минимум, в точке В – максимум.

Рассмотренная задача дает единственность оптимального решения. Для некоторых задач может существовать несколько допустимых решений со значениями целевой функции, соответствующими оптимальному решению задачи.

Графический метод решения удобен лишь для случая решения задачи оптимизации при двух переменных целевой функции и линейных ограничениях.

### **Симплексный метод линейного программирования**

Симплексный метод линейного программирования применяется для решения оптимизационных задач, содержащих более двух переменных. Симплекс (от лат. *simplex* – простой) – в математике простейший выпуклый многогранник данного числа измерений. Трехмерный симплекс ( $n = 3$ ) – тетраэдр, двухмерный ( $n = 2$ ) – треугольник,  $n$ -мерный симплекс имеет  $n + 1$  вершин. Хотя симплексный метод и ориентирован на применение при оптимизации экономических, ресурсных и транспортных задач, он пригоден также для решения условных линейных технических задач, в частности задач технической диагностики.

Большинство задач технической диагностики сводится к поиску минимума функции издержек  $F(x)$ , связанных с эксплуатацией и ремонтом машин. В качестве переменной  $x$  могут быть параметры технического состояния (допустимые или предельные значения), погрешность и достоверность измерения этого параметра, периодичность диагностирования и т.д.

Общая задача линейного программирования формулируется следующим образом: определить минимум линейной функции

$$Z = Z(x_1 \dots x_n) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots c_n x_n \rightarrow \min$$

при ограничениях:  $x_i \geq 0 (i = \overline{1, n})$ ;

$$\left. \begin{aligned} a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n &= b_i; & (i = 1, m) \\ d_{i1}x_1 + d_{i2}x_2 + \dots + d_{in}x_n &\leq e_i; & (i = 1, k) \\ f_{i1}x_1 + f_{i2}x_2 + \dots + f_{in}x_n &\geq h_i. & (i = 1, e) \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Общую задачу линейного программирования приводят к канонической форме путем введения дополнительных переменных  $x_{n+1} \geq 0$  ( $i = 1, k$ ) и  $x_{n+1} \leq 0$  ( $i = 1, e$ ).

Тогда неравенства (4.8) приобретут вид равенств:

$$\begin{aligned} d_{i1}x_1 + d_{i2}x_2 + \dots + d_{in}x_n + x_{n+1} &= e_i; & (i = 1, k) \\ f_{i1}x_1 + f_{i2}x_2 + \dots + f_{in}x_n + x_{n+1} &= h_i. & (i = 1, e) \end{aligned}$$

Общая схема решения задач линейного программирования симплексным методом показана на рис 4.11. Она состоит из пяти этапов.

1. Определение ранга матрицы, образованной коэффициентами и свободными членами. Если ранг матрицы  $A$  меньше  $m$  строк, можно отбросить линейно зависимые строки: число оставленных в матрице строк должно равняться ее рангу.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

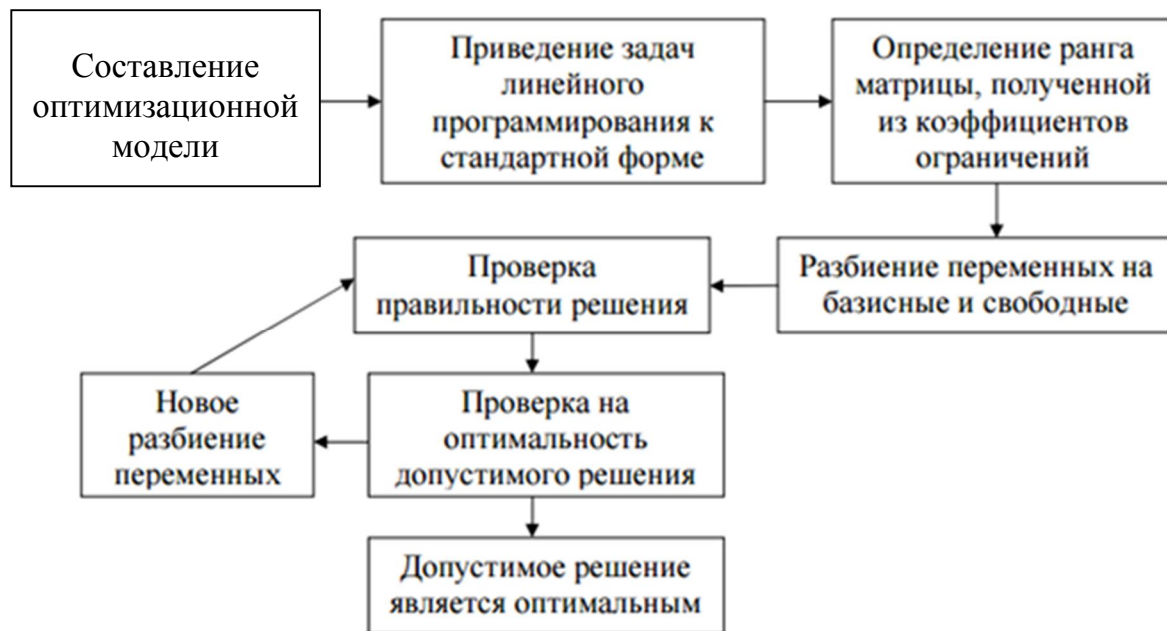


Рис. 4.11. Схема решения задачи линейного программирования симплекс-методом

2. Переменные  $x_1; x_2, \dots, x_n$  разбиваются на две группы: первая содержит  $m$  базисных переменных, вторая  $n - m$  свободных переменных. Пусть  $x_1, \dots, x_m$  базисные,  $x_{m+1}, \dots, x_n$  свободные переменные. Базисные переменные выражаются через свободные:





### *Приведение задач линейного программирования к стандартной форме*

При решении задач линейного программирования симплекс-методом требуется, чтобы задача была представлена в стандартной форме, т.е. все неравенства должны быть представлены равенствами, а все отрицательные переменные преобразованы в неотрицательные. На практике задачи линейного программирования чаще не имеют стандартной формы. Часто ограничения имеют вид неравенств. В некоторых задачах не все переменные неотрицательные. Первый этап решения задачи линейного программирования состоит в приведении ее к стандартной форме.

Ограничения в виде неравенств преобразуются в равенства при помощи введения остаточных или избыточных переменных.

Например, неравенство вида  $x_1 + 2x_2 + 5x_3 \leq 25$  можно преобразовать в равенство путем введения остаточной переменной  $x_4$ :

$$x_1 + 2x_2 + 5x_3 + x_4 = 25.$$

Переменная  $x_4$  неотрицательна и соответствует разности правой и левой частей.

Неравенство вида  $2x_1 + x_2 - 3x_3 \leq 12$  преобразуется в равенство путем введения избыточной переменной  $x_5$ :

$$2x_1 + x_2 - 3x_3 - x_5 = 12.$$

В тех случаях, когда переменные принимают как положительные, так и отрицательные значения, т.е. не ограниченные по знаку, неограниченные переменные заменяются разностью двух неотрицательных переменных.

Рассмотрим пример приведения задачи к стандартной форме.

Максимизировать  $Z = x_1 - 2x_2 + 3x_3$  при ограничениях:

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 7;$$

$$x_1 - x_2 + x_3 \geq 2;$$

$$3x_1 - x_2 + x_3 = -5;$$

$$x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0;$$

$x_3$  – переменная, не ограниченная по знаку.

Последовательность приведения:

- 1) заменим  $x_3$  на  $x_4 - x_5$ , где  $x_4 \geq 0, x_5 \geq 0$ ;
- 2) умножим обе части ограничений на (-1);
- 3) введем дополнительные переменные  $x_6$  и  $x_7$  во втором и третьем ограничениях соответственно;

4) припишем в целевой функции нулевой коэффициент переменным  $x_6$  и  $x_7$ , целевая функция при этом не меняется.

Таким образом, стандартная задача будет выглядеть следующим образом:

максимизировать  $Z = x_1 - 2x_2 + 3x_4 - 3x_5$  при ограничениях

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 + x_4 - x_5 + x_6 &= 7, \\x_1 - x_2 + x_4 - x_5 + x_7 &= 2, \\-3x_1 + x_2 - 2x_4 - 2x_5 &= 5, \\x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 &\geq 0.\end{aligned}$$

Используя стандартную форму, получаем в матричных обозначениях: максимизировать  $Z = cx$  при ограничениях  $Ax = b, x \geq 0$ .

Основные определения можно сформулировать следующим образом:

- допустимое решение представляет собой неотрицательный вектор  $x$ , для которого выполняются ограничения  $Ax = B$ ;
- допустимая область  $S$  состоит из всех допустимых решений;
- оптимальным решением называется такой допустимый вектор  $x_0$ , для которого целевая функция  $cx_0$  больше любого другого допустимого решения, т.е. тогда, когда  $x_0 \in S$  и  $cx_0 \geq cx$  для всех  $x \in S$ ;
- оптимальное значение задачи. Пусть  $Z_0$  – значение целевой функции, соответствующее оптимальному значению, т.е.  $Z_0 = cx_0$ ;
- неединственность оптимального решения соответствует случаям, когда задача линейного программирования имеет более одного оптимального решения;
- неограниченный оптимум соответствует случаю, когда задача линейного программирования не обладает конечным оптимумом, т.е.  $\max Z \rightarrow \infty$  или  $\min Z \rightarrow \infty$ .

При решении задач линейного программирования число уравнений меньше числа переменных ( $m < n$ ), т. е. задача имеет бесконечное множество решений. Классическим методом решения систем линейных уравнений является метод Гаусса - Жордана. Основная идея этого метода состоит в сведении системы  $m$  уравнений с  $n$  неизвестными к каноническому виду с помощью элементарных операций над строками:

- умножением любого уравнения системы на положительное или отрицательное число;
- прибавлением к любому уравнению другого уравнения системы, умноженного на положительное или отрицательное число.

В результате элементарных преобразований коэффициент при некоторой переменной в одном из уравнений системы сводят к единице, в других уравнениях - к нулю. Переменные  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , входящие с единичными коэффициентами только в одно уравнение системы и с нулевыми – в остальные, называются базисными или зависимыми. Остальные  $n - m$  переменные ( $x_{m+1}, \dots, x_n$ ) называются небазисными или независимыми переменными.



$$\begin{aligned}x_1 - x_2 &\leq 3, \\x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0.\end{aligned}$$

Графическое решение задачи дано на рис. 4.12.

Приведенная к стандартной форме задача имеет вид: максимизировать  $Z = 3x_1 + 2x_2$  при ограничениях

$$\begin{aligned}-x_1 + 2x_2 + x_3 &= 4, \\3x_1 + 2x_2 + x_4 &= 14, \\x_1 - x_2 + x_5 &= 3, \\x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0, x_5 \geq 0.\end{aligned}$$

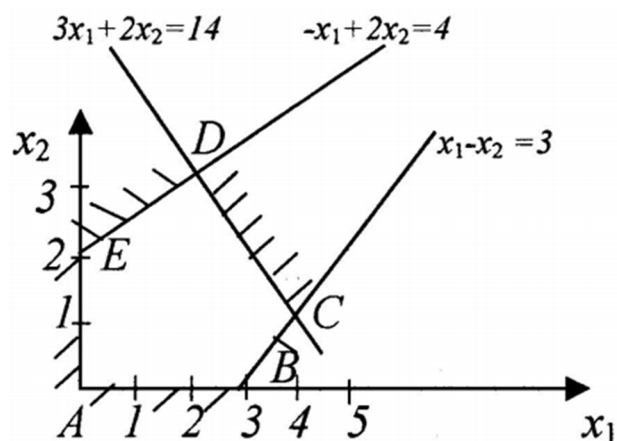


Рис. 4.12. Графическое представление ограничений

Представим целевую функцию и ограничения в виде таблицы (табл. 4.4). Базисными переменными являются  $x_3$ ,  $x_4$ , и  $x_5$ . Из таблицы берем начальное допустимое базисное решение: положив  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 0$ , получим  $x_3 = 4$ ,  $x_4 = 14$ ,  $x_5 = 3$ . Значение целевой функции  $Z = 3x_1 + 2x_2 = 0$  (точка A).

Таблица 4.4

Значения целевой функции и ограничений

Базис	$x_i$					Постоянные
	3	2	0	0	0	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
$x_3$	-1	2	1	0	0	4
$x_4$	3	2	0	1	0	14
$x_5$	1	-1	0	0	1	3

Рассмотрим новые базисные переменные  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_1$  (табл. 4.5). Для этого:

- 1) прибавим третью строку к первой, чтобы исключить переменную  $x_1$ ;
- 2) умножим третью строку на (-3) и прибавим ее ко второй строке, чтобы исключить переменную  $x_3$ ;
- 3) третью строку оставим без изменения.

Таблица 4.5

Значения целевой функции и ограничений с новыми базисными данными

Базис	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Постоянные
$x_3$	0	1	1	0	1	7
$x_4$	0	5	0	1	-3	5
$x_1$	1	-1	0	0	1	3

Приравнивая  $x_5 = 0$  и  $x_2 = 0$ , получим:

$$x_3 = 7; \quad x_4 = 5; \quad x_1 = 3; \quad Z = 3 \cdot 3 = 9 \text{ (точка В на рис. 4.12).}$$

Введем базисное решение  $x_2$ , выведя из базиса переменную  $x_4$ , для этого:

- 1) вторую строку уменьшим в 5 раз и вычтем ее из первой строки;
- 2) вторую строку разделим на 5;
- 3) разделив вторую строку на 5 и сложив ее с первой строкой, получим третью строку.

Получим новые значения целевой функции и ограничений (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Значения целевой функции и ограничений

Базис	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Постоянные
$x_3$	0	0	1	-1/5	8/5	6
$x_2$	0	1	0	1/5	-3/5	1
$x_1$	1	0	0	1/5	2/5	4

Приравнивая  $x_4 = 0$ ;  $x_5 = 0$ , получим:

$$x_3 = 6; \quad x_2 = 1; \quad x_1 = 4; \quad Z_C = 3 \cdot 4 + 2 \cdot 1 = 14.$$

Введем переменную  $x_5$  в базис, для этого:

- 1) первую строку умножим на 5/8;
- 2) первую строку умножим на 3/8 и прибавим вторую строку;
- 3) из третьей строки вычтем первую строку, разделенную на 4, получим окончательное значение целевой функции (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Значения целевой функции и ограничений

Базис	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Постоянные
$x_5$	0	0	5/8	-1/8	1	15/4
$x_2$	0	1	3/8	1/8	0	13/4
$x_1$	1	0	-1/4	1/4	0	5,2

Приравнивая  $x_3 = 0$ ,  $x_4 = 0$ , получим:

$$x_5 = 14/15; \quad x_2 = 13/4; \quad x_1 = 5/2; \quad Z_D = 3 \cdot 5/2 + 2 \cdot 13/4 = 14.$$

Максимальное значение целевой функции  $Z = 14$  находится на прямой CD (см. рис. 4.12), т.е. задача имеет множественные решения.

### ***Анализ чувствительности в линейном программировании***

В ряде задач линейного программирования возникает необходимость изменять некоторые параметры системы (финансы, производственные мощности, ресурсы и т.п.), что приводит к изменению найденного оптимального решения. Для выявления этих изменений проводят анализ чувствительности. Если обнаруживается, что оптимальное решение можно значительно улучшить путем небольших изменений заданных параметров, то целесообразно реализовать эти изменения. Кроме того, во многих случаях оценки параметров получаются путем статистической обработки ретроспективных данных (например, ожидаемый сбыт, прогнозы цен и затрат). Оценки, как правило, не могут быть точными. Если удастся определить, какие параметры в наибольшей степени влияют на значение целевой функции, то целесообразно увеличить точность оценок именно этих параметров, что позволит повысить надежность рассматриваемой модели и получаемого решения.

## **4.5. Нелинейное программирование при решении задач оптимизации**

Нелинейное программирование применяется при решении задач, в которых нелинейны и (или) целевая функция, и (или) ограничения в виде равенств и неравенств и для которых методы математического анализа оказываются непригодными. Нелинейное программирование представляет наиболее характерный метод оптимизации при проектировании машин и технологических процессов и служит для выбора наилучшего плана распределения ограниченных материальных, финансовых и трудовых ресурсов.

### ***Метод множителей Лагранжа***

Метод множителей Лагранжа применяется в тех случаях, когда целевая функция и ограничения представлены нелинейными функциями нескольких переменных. Одним из методов решения подобных задач является метод множителей Лагранжа, при котором задача с ограничениями преобразуется в элементарную задачу безусловной оптимизации, в которой используются некоторые неизвестные параметры, называемые множителями Лагранжа.

Пусть целевая функция  $N$  переменных

$$f(x_1; x_2; \dots; x_N) \rightarrow \min \quad (4.12)$$

при ограничении

$$h_1(x_1; x_2; \dots; x_N) = 0. \quad (4.13)$$

По методу Лагранжа эта задача преобразовывается в следующую задачу безусловной оптимизации:

$$L(x; \lambda) = f(x) - \lambda h_1(x), \quad (4.14)$$

где  $L(x; \lambda)$  – функция Лагранжа;

$\lambda$  – неизвестная постоянная, называемая множителем Лагранжа;

ограничение

$$L(x; \lambda) = f(x_1; x_2; \dots; x_N) - \lambda h_1(x_1; x_2; \dots; x_N),$$

частные производные

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial x_n} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0.$$

Для поиска условного минимума функции (4.12) при ограничении (4.13) необходимо составить функцию Лагранжа (4.14), взять частные производные от этой функции и приравнять их к нулю. Из системы уравнений, образованных частными производными, найти точки, соответствующие минимуму целевой функции. Эти точки принадлежат одному из множеств: множеству стационарных точек или множеству точек границы. Подставив найденные точки в целевую функцию, получаем ее минимальное (максимальное) значение.

**Пример.** Минимизировать  $Z = x_1 + x_2$  при ограничении  $x_1^2 + x_2^2 = 1$ .

Задача решается следующим способом.

Функция Лагранжа  $L(x; \lambda) = f(x_1 + x_2) - \lambda(x_1^2 + x_2^2 - 1)$ .

Частные производные функции Лагранжа:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 1 - 2\lambda x_1 = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial x_2} = 1 - 2\lambda x_2 = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = x_1^2 + x_2^2 - 1 = 0.$$

Эта система трех уравнений с тремя неизвестными дает следующие решения.

Из первых двух уравнений имеем  $x_1 = x_2$ ; из третьего уравнения  $x_{1,2} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Максимальное и минимальное решения целевой функции:

$$Z_{\min} = -\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} = -\sqrt{2}; \quad Z_{\max} = \sqrt{2}.$$

Развитием метода Лагранжа при нелинейном программировании является метод квадратического программирования.

Задачи квадратического программирования характеризуются квадратной зависимостью целевой функции и линейной зависимостью ограничений:

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n d_{jk} x_j x_k \rightarrow \max; q_i(x) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i, x_j \geq 0. \quad (4.15)$$

Для решения этих задач разработаны методы, основанные на теореме Куна - Таккера, которые представляют собой обобщение метода множителей Лагранжа для определения экстремума при наличии ограничений, представляющих не только равенства, но и неравенства.

### **Метод последовательной частной оптимизации**

В техническом проектировании очень часто встречаются задачи, обладающие свойством монотонности используемых зависимостей. Заметим, что монотонность является легко устанавливаемым свойством функции. Функция  $f(x)$  называется возрастающей функцией одной из независимых переменных  $x_1$ , тогда и только тогда, когда  $\frac{\partial f}{\partial x_1} > 0$ , и убывающей,

когда  $\frac{\partial f}{\partial x_1} < 0$ .

Функция  $f(x)$  называется независимой относительно  $x$  тогда, когда  $\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0$  при всех  $x_1 > 0$ .

Например, масса стержня круглого сечения, работающего на растяжение, и допустимая нагрузка на стержень непрерывно возрастают при увеличении диаметра стержня, т.е. представляют собой монотонно возрастающие функции его диаметра. Приняв в качестве ограничения предельную нагрузку на стержень  $F$ , получим при известном допускаемом напряжении  $[\sigma]$  ограничения в виде неравенства

$$[\sigma] \frac{\pi d^2}{4} \geq F.$$

Допустим, что масса стержня не задана в виде специальной функции от диаметра, но известно, что эта функция монотонна. Этого вполне достаточно, чтобы вместо требуемой минимизации массы минимизировать диаметр стержня:

$$d \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]}}.$$

Понятие монотонности распространяется также на задачи, в которых имеется несколько переменных. Метод, в котором переменными опериру-



ют не одновременно, а поочередно, называется методом последовательной частной оптимизации.

Рассмотрим задачу определения оптимальных размеров резервуара высокого давления методом последовательной частной оптимизации.

Необходимо спроектировать резервуар объемом  $Q = 25 \text{ м}^3$  для хранения сжатого газа при давлении  $p = 2 \text{ МПа}$ . Резервуар должен представлять цилиндрический сосуд с верхним и нижним плоскими днищами (рис. 4.13). Цилиндрическая часть резервуара должна быть изготовлена из двух листов углеродистой стали. Днища из того же материала привариваются к торцам цилиндрической части V-образными стыковыми сварными швами. Длина цилиндрической части резервуара не должна превышать  $l = 6 \text{ м}$ .

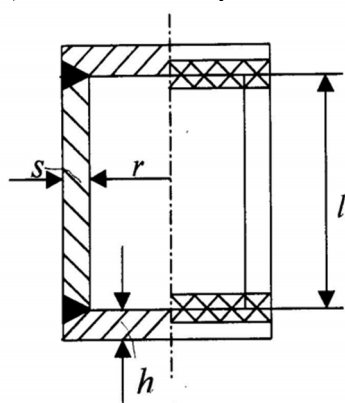


Рис. 4.13. Резервуар

В качестве целевой функции принимается минимизация общей стоимости резервуара, которая пропорциональна массе резервуара и выражается зависимостью  $C(h; s; r; l) \rightarrow \min$ .

Стоимость резервуара складывается из стоимости днищ  $C(h; r)$  и стоимости оболочки  $C(s; r; l)$ . По методу последовательной частной оптимизации сначала находится частный минимум функции  $C(h; r)$  по  $h$  при постоянном  $r$  при одном ограничении

$$h \geq Hr, \quad (4.16)$$

где  $H$  – параметр, зависящий от давления, допускаемого напряжения в зоне стыка.

Стоимость днища является возрастающей функцией от  $h$ :

$$C(h, r) = (C_h r^2)h,$$

где  $C_h$  – расчетный положительный параметр.

Для минимизации стоимости днища необходимо сделать его толщину как можно меньшей, приближая к границе  $h = H \cdot r$ . Таким образом, минимальная стоимость днища равна

$$\min C(h, r) = (C_h H) r^3,$$

причем выражение  $(C_h H)$  является параметром, а не переменной.

Следующий шаг решения задачи – частная оптимизация общей стоимости резервуара по толщине стенки  $s$  при постоянных  $h, r, l$  при одном ограничении  $s \geq K_S r$ , где  $K_S$  – параметр, определяемый из условия прочности обечайки. Фактические стоимости достигают минимума, когда  $s = K_S r$ . Стоимость обечайки пропорциональна ее объему:

$$C(s, r, l) = C_S r l s = C_S K_S r^2 l, \quad (4.17)$$

где  $C_s$  – параметр, характеризующий коэффициент пропорциональности между стоимостью и переменными параметрами, стоимостью и сбытом.

Минимизация по  $r$  и  $l$  имеет ограничения в виде объема:

$$Q \geq \pi r^2 l. \quad (4.18)$$

Оптимальная величина стоимости резервуара является возрастающей функцией объема, откуда  $l = Q/\pi r^2$ .

Исключение  $l$  из выражения (4.17) приводит зависимость (4.15) к виду

$$C(s, r, l) = C_s r l s = \frac{C_s K_s Q}{\pi}; \quad C = \frac{Q}{\pi} C_2 K_2 + C_H H r^3.$$

Стоимость резервуара представляет собой возрастающую функцию радиуса  $r$ . Таким образом, для минимизации общей стоимости необходимо, чтобы радиус резервуара имел минимально допустимую величину, что будет обеспечено установлением максимально допустимой длины цилиндрической обечайки.

По найденному по формуле (4.17) радиусу обечайки находится толщина стенки обечайки и днища.

Заметим, что по формуле (4.16) и зависимости  $h = H \cdot r$  проектное решение найдено без какой-либо информации о стоимостных параметрах.

### **Проектирование гидравлического цилиндра по методу последовательной частной оптимизации**

Задание: спроектировать гидравлический цилиндр с минимальным наружным диаметром  $d_H$ , обеспечивающим силу на штоке  $F$ , превышающую некоторое минимальное значение  $F_{\min}$  при следующих ограничениях (рис. 4.14):

- толщина стенки  $\delta$  должна быть из технологических соображений больше некоторой минимально возможной величины  $\delta_{\min}$ ;
- давление жидкости  $p$  должно быть меньше, чем максимально возможное давление  $p_{\min}$ ;
- напряжение в стенках цилиндра  $\sigma$  должно быть меньше допустимого напряжения  $[\sigma]$ .

Оптимизационная модель  $d_H \rightarrow \min$  при ограничениях:

$$F \geq F_{\min}; \quad \delta \geq \delta_{\min}; \quad p \leq p_{\max}; \quad \sigma = \frac{p d_B}{2\delta} \leq [\sigma]. \quad (4.19)$$

Независимыми переменными являются внутренний диаметр  $d_B$ , толщина стенки  $\delta$  и напряжение  $\sigma$ .

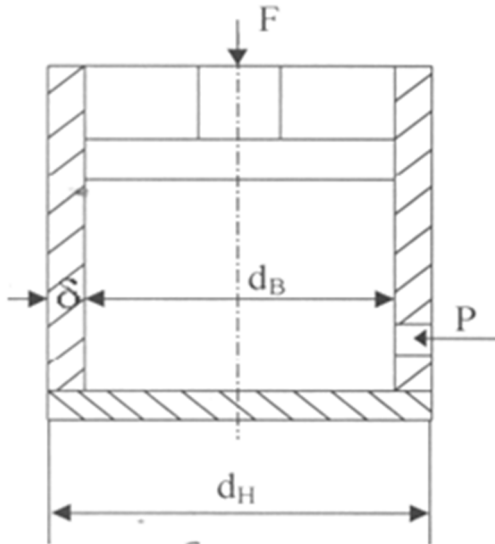


Рис. 4.14. Гидроцилиндр

Развиваемая цилиндром сила  $F$ , давление  $p$  и внутренний диаметр  $d_B$  связаны соотношением

$$F = p \frac{\pi d_B^2}{4}. \quad (4.20)$$

Для исследования монотонности исследуем функцию ограничений, полученную из зависимости (4.20):

$$\varphi_1 = p \frac{\pi d_B^2}{4F} = 1.$$

Функция ограничений  $\varphi_1$  монотонно возрастает с увеличением  $p$  и  $d_B$  и уменьшается с увеличением  $F$ .

Зависимость между напряжением  $\sigma$ , давлением  $p$  и внутренним диаметром  $d_B$  определяется формулой (4.19), откуда функция ограничений

$$\varphi_2 = \frac{2\delta\sigma}{pd_B} = 1. \quad (4.21)$$

Функция  $\varphi_2$  монотонно возрастает с увеличением  $\delta$  и  $\sigma$  уменьшается с увеличением  $p$  и  $d_B$ .

Все функции монотонны. Между диаметрами наружным и внутренним имеется зависимость  $d_H = d_B + 2\delta$ .

Из формул (4.20) и (4.21) имеем

$$d_B = \sqrt{\frac{4F}{\pi p}}; \quad 2\delta = \frac{pd_B}{\sigma}. \quad (4.22)$$

Целевая функция представляется в виде

$$d_H = \sqrt{\frac{4F}{\pi p}} + \frac{pd_B}{\sigma} \rightarrow \min. \quad (4.23)$$

Переменные  $F$  и  $\sigma$  встречаются в целевой функции каждая только в одном слагаемом. Причем функция  $F$  ограничена снизу, а функция  $\sigma$  — сверху. С увеличением  $F$  наружный диаметр  $d_H$  монотонно возрастает. Следовательно, минимальное значение  $d_H$  при  $F = F_{\min}$ . С увеличением  $\sigma$  диаметр  $d_H$  монотонно уменьшается. Следовательно, для минимизации  $d_H$  необходимо взять  $\sigma = \sigma_{\max}$ . Тогда  $d_H$  остается только функцией  $p$ :

$$d_H = \sqrt{\frac{4F}{\pi p}} + \frac{pd_B}{[\sigma]} \rightarrow \min$$

или

$$d_H = A_1 p^{-\frac{1}{2}} + A_2 p \rightarrow \min,$$

где

$$A_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi} F_{\min}}; \quad A_2 = \frac{d_B}{[\sigma]}.$$

Иначе задача сводится к безусловной оптимизации. Взяв производную и приравняв ее к нулю, найдем значение  $p$ , при котором  $d_H$  будет минимальным:

$$\frac{dd_H}{dp} = -\frac{1}{2} A_1 p^{-\frac{3}{2}} + A_2 = 0,$$

откуда

$$p = \sqrt[3]{\left(\frac{A_1}{2A_2}\right)^2}.$$

#### 4.6. Примеры оптимизации технических решений при проектировании и эксплуатации технологического оборудования ЦБП

Одной из актуальных проблем машиноведения является оптимизация проектирования машин и конструкций. Большинство технологических машин ЦБП в связи с увеличением их скоростей и снижением удельной металлоёмкости работают в интенсивных динамических режимах. Поэтому особое значение приобретают исследования методов оптимизации вибрационных процессов в машинах и оборудовании.

Основной задачей вибрационной оптимизации при проектировании технологического оборудования является выбор параметров конструктивных элементов оборудования, прежде всего валов и роторов, станин и фундаментов, обеспечивающих требуемые вибрационные характеристики при минимизации затрат на изготовление и монтаж. В качестве вибрационных характеристик целесообразно принять критические частоты вращения валов и роторов и требуемые низшие частоты колебаний станин, фундаментов и их элементов.

Оборудование отраслей ЦБП является массивным. Стоимости его элементов пропорциональны массам. Следовательно, в качестве целевой функции при оптимизации принимается минимизация массы. Ограничивающими функциями, кроме критических частот вращения валов и роторов и низших собственных частот колебаний конструктивных элементов станин и фундаментов, принимаются критерии прочности, жесткости, устойчивости, технологические ограничения, связанные с изготовлением

конструкций, эксплуатационные ограничения, габаритные и прочие ограничения.

Целевая функция и большинство функций ограничения являются нелинейными, все задачи имеют условия ограничения. Поэтому методы безусловной оптимизации, методы, основанные на линейном программировании, в частности широко используемый симплекс-метод, не могут быть применены при решении задач вибрационной оптимизации. Для решения этих задач приемлемы методы нелинейного программирования, в частности метод множителей Лагранжа, метод квадратического программирования, а также метод последовательной оптимизации или метод динамической оптимизации.

При виброакустическом проектировании часто встречаются задачи, обладающие свойством монотонности используемых зависимостей. Наличие монотонных функций позволяет решать задачи вибрационной оптимизации методом последовательной частной оптимизации или методом динамического программирования. Рассмотрим этот метод на примере вибрационной оптимизации трубчатого вала бумагоделательной машины.

### ***Вибрационная оптимизация трубчатых валов бумагоделательных машин***

Основными параметрами трубчатых валов бумагоделательных и отделочных машин при заданном расстоянии между опорами  $l$  и скорости машины  $V_M$  являются наружный диаметр  $d_H$  и толщина стенки трубы  $\delta$ . При выборе параметров валов учитываются следующие факторы:

- обеспечение технологического процесса производства или обработки бумаги, где обычно ограничивается минимальное значение диаметра ( $d_H \geq d_{Hmin}$ );
- габаритные размеры составной части машины, ограничивающие максимальное значение ( $d_H \leq d_{Hmax}$ );
- прочность вала, при которой напряжение  $\sigma$  в конструкциях вала, прежде всего в рубашке, не превышает допустимых значений  $[\sigma]$ ; ( $\sigma \leq [\sigma]$ );
- жесткость вала, при которой прогиб рубашки вала от нагрузок не превышает допустимых значений ( $y \leq [y]$ );
- предотвращение резонансных и околорезонансных колебаний вала, которое обеспечивается тем, что частота вращения вала  $\omega$  не совпадает с критической частотой  $\omega_0$  ( $0,7\omega_0 \geq \omega \geq 1,3\omega_0$ );
- технологические требования на изготовление, ремонт и эксплуатацию валов, заключающиеся в том, что толщина стенки  $\delta$  не может быть меньше некоторого минимально допустимого значения  $[\delta_{min}]$  ( $\delta \geq \delta_{min}$ );
- минимальные затраты на изготовление вала.

Затраты на изготовление трубчатых валов примерно пропорциональны их массе. Следовательно, валы должны иметь как можно меньшую массу.

В качестве целевой функции принимается масса рубашки вала. Ограничениями являются все вышеназванные факторы; независимыми переменными являются наружный диаметр вала  $d_H$  и толщина стенки рубашки вала  $\delta$ .

Расчетная схема вала показана на рис. 4.15, где обозначено:

$l$  – расстояние между осями опор вала, м;

$b$  – длина рубашки вала, м;

$q_0$  – распределенная технологическая нагрузка на вал, приведенная к вертикальной плоскости (от натяжения сетки, сукна, бумаги), Н/м;

$q_m$  – распределенная нагрузка от собственного веса рубашки вала.

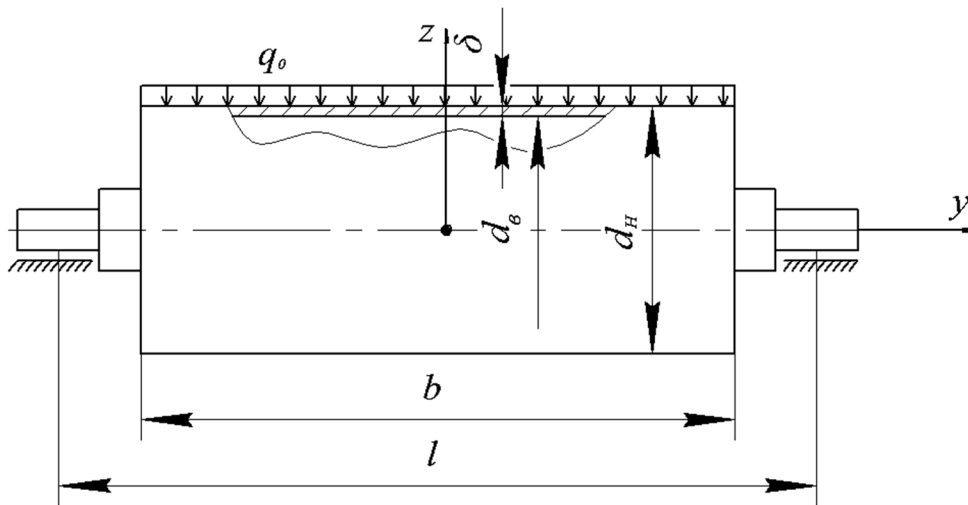


Рис. 4.15. Расчетная схема вала

Масса вала:

$$m = \pi \delta (d_H - \delta) b \cdot \rho \approx \pi d_{cp} \delta b \rho_{cp}; \quad d_{cp} = d_H - \delta \quad (4.24)$$

или  $m = A_0 d_{cp} \delta \rightarrow \min$ , где  $A_0 = \pi b \rho$ ,  $\rho$  – плотность материала рубашки вала, кг/м<sup>3</sup>.

Зависимость (4.24) является целевой функцией, следует определить параметры  $d_H$  и  $\delta$ , при которых масса  $m$  будет минимальной при следующих ограничениях.

Прочность рубашки вала

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma],$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение в рубашке вала в сечении  $y$ , Па;

$W$  – момент сопротивления сечения рубашки вала, м<sup>3</sup>,

$$W = \pi \cdot \frac{d_H^3 - d_B^3}{32} \approx \frac{\pi d_{cp}^2 \delta}{4}.$$

Изгибающий момент в сечении у вала равен

$$M_x = q \left( \frac{bl}{4} - \frac{b^2}{8} - \frac{y^2}{2} \right).$$

Максимальное значение изгибающего момента в середине пролета вала:

$$M = \frac{qb}{4} \left( l - \frac{b}{2} \right),$$

где  $q = q_0 + q_m$  – суммарная распределенная нагрузка на вал, Н/м.

Здесь  $q_m$  – распределенная нагрузка от собственного веса рубашки, Н/м,

$$q_m = \frac{mg}{b},$$

$g$  – ускорение свободного падения тела, м/с<sup>2</sup>;

$$\sigma = \left( \frac{q_0}{\pi d_{cp}^2 \delta} + \frac{\pi \rho g}{d_{cp}} \right) \cdot \left( l - \frac{b}{2} \right) \leq [\sigma]. \quad (4.25)$$

Прогиб рубашки вала определяется из дифференциального уравнения

$$\frac{d^2 z}{dy^2} = \frac{M_y}{EJ},$$

где  $J$  – момент инерции сечения рубашки,

$$J = \pi (d_H^4 - d_B^4) / 64 \approx \frac{\pi d_{cp}^3 \delta}{8};$$

$E$  – модуль продольной упругости материала рубашки вала, Па.

Максимальный динамический изгиб вала, определенный из решения дифференциального уравнения, равен

$$y_{max} = \frac{qb^3}{384EJ} (12l - 7b).$$

Относительный прогиб  $\varepsilon = y_{max}/b$  рубашки вала с учетом входящих величин  $q$  и  $J$  равен

$$\left( \frac{q_0}{\pi d_{cp}^3 \delta} + \frac{\rho g}{d_{cp}^2} \right) \frac{b^2}{48\varepsilon} (12l - 7b) \leq [\varepsilon]. \quad (4.26)$$

Для учета ограничений по виброактивности вал принимается работающим в дорезонансной зоне. В этом случае ограничение представляется в виде

$$\omega \leq \alpha \beta \omega_{01},$$

где  $\omega = V_M / (30d_H)$  – частота вращения вал, а  $V_M$  – скорость машины, м/мин.

Тогда

$$30\alpha\beta\omega_{01}d_H \geq V_M,$$

где  $\beta \leq 1,0$  – коэффициент, учитывающий влияние на низшую собственную частоту колебаний вала  $\omega_{01}$  (по первой форме колебаний) упругой податливости цапф, опор;

$\alpha = 0,7$  – коэффициент, учитывающий максимально возможное приближение частоты вращения вала к его низшей собственной частоте колебаний  $\omega_0$ , определяемой как балки на шарнирной опоре по формуле

$$\omega_0 = \pi^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho l^4}},$$

откуда

$$30\alpha\beta\pi^2 \sqrt{\frac{E\pi}{g\rho l^4}} \left( d_{cp}^{\frac{5}{2}} \delta^{\frac{1}{2}} + d_{cp}^{\frac{3}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \right) \geq V_{\max}. \quad (4.27)$$

Технологические ограничения на минимальную толщину стенки рубашки вала:

$$\delta \geq [\delta];$$

для сплошного вала  $\delta = d_H / 2$ , следовательно  $\delta \leq d_{cp}$ ,

$$d_{cp} \geq \delta \geq [\delta]. \quad (4.28)$$

Наружный диаметр рубашки вала ограничивается неравенствами:

$$d_{H\min} \leq d_H \leq d_{H\max}.$$

Следовательно,

$$d_{H\min} \leq d_{cp} + \delta \leq d_{H\max}. \quad (4.29)$$

Итак, задача оптимизации представляется нелинейной целевой функцией (4.24), ограничениями (4.25; 4.26; 4.27) и пределами (4.28) и (4.29).

Из целевой функции (4.24) вытекает: минимизация массы рубашки вала обеспечивается на минимально допустимых значениях среднего диаметра  $d_{cp}$  и толщины стенки  $\delta$ . Оптимальное соотношение между  $d_{cp}$  и  $\delta$  может быть определено из функции ограничений. Из ограничения (4.25) вытекает, что минимальные значения  $d_{cp}$  и  $\delta$  обеспечиваются при максимально допустимом значении нормального напряжения  $\sigma = [\sigma]$ . При этом условие ограничения (4.25) представляется в виде функции

$$\varphi_1 = A_1 d_{cp}^{-2} \delta^{-1} + A_2 d_{cp}^{-1} - 1, \quad (4.30)$$

где

$$A_1 = \frac{q_0}{\pi[\sigma]} \left( l - \frac{b}{2} \right); \quad A_2 = \frac{\pi \rho g}{[\sigma]} \left( l - \frac{b}{2} \right).$$



Из ограничения (4.25) следует, что минимальные значения  $d_{cp}$  и  $\delta$  будут при максимально возможном относительном прогибе рубашки  $\varepsilon \leq [\varepsilon]$ . Уравнение (4.26) представляется в виде функции

$$\varphi_2 = A_3 d_{cp}^{-3} \delta^{-1} + A_4 d_{cp}^{-2} - 1, \quad (4.31)$$

где

$$A_3 = \frac{q_0 b^2}{\pi [\varepsilon] 48 E} (12l - 7b); \quad A_4 = \frac{\rho g}{[\varepsilon]} \frac{b^2}{48 E} (12l - 7b).$$

Ограничение (4.27) свидетельствует, что  $d_{cp}$  и  $\delta$  уменьшаются с понижением скорости машины  $V_M$ . Но при проектировании вала нужно обеспечить работу машины на максимальной скорости  $V_M = V_{\max}$ . Ограничение (4.27) в виде функции будет иметь вид

$$\varphi_3 = A_5 \left( d_{cp}^{\frac{5}{2}} \delta^{\frac{1}{2}} + d_{cp}^{\frac{3}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \right) - 1, \quad (4.32)$$

где

$$A_5 = \frac{30 \alpha \beta \pi^2}{l^2 V_{\max}} \sqrt{\frac{E \pi}{8 \rho}}.$$

Таким образом, неравенства (4.25), (4.26), (4.27) преобразованы в равенства (4.30), (4.31), (4.32).

Определение оптимальных значений  $d_{cp}$  и  $\delta$  могло быть проведено, например, по методу Лагранжа. Функция Лагранжа в этом случае приняла бы вид

$$L = A_0 d_{cp} \delta + \lambda_1 (A_1 d_{cp}^{-2} \delta^{-1} + A_2 d_{cp}^{-1} - 1) + \lambda_2 (A_3 d_{cp}^{-3} \delta^{-1} + A_4 d_{cp}^{-2} - 1) + \lambda_3 (A_5 (d_{cp}^{\frac{5}{2}} \delta^{\frac{1}{2}} + d_{cp}^{\frac{3}{2}} \delta^{\frac{3}{2}})),$$

где  $\lambda_{1, 2, 3}$  – множители Лагранжа.

Минимум функции нашелся бы из системы алгебраических уравнений, образованных частными производными функции Лагранжа по каждой переменной

$$\frac{\partial L}{\partial U_i} = 0,$$

но применение метода последовательной частной оптимизации упрощает решение задачи. Анализ функций (4.29), (4.30), (4.31) показывает, что функции  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  уменьшаются, а функция  $\lambda_3$  увеличивается с увеличением среднего диаметра рубашки более интенсивно, чем с увеличением толщины стенки  $\delta$ . Следовательно, оптимальным является решение при максимально возможном наружном диаметре рубашки вала  $d_{H\max}$ . Подставив в функции  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  значение среднего диаметра  $d_{cp} = d_{H\max} - \delta$ , получим

следующие формулы для определения толщины стенки по прочности, жесткости и виброустойчивости вала:

$$\begin{aligned} A_1(d_{H \max} - \delta)^{-2}\delta^{-1} + A_2(d_{H \max} - \delta)^{-1} - 1 &= 0; \\ A_3(d_{H \max} - \delta)^{-3}\delta^{-1} + A_4(d_{H \max} - \delta)^{-2} - 1 &= 0; \\ A_5[(d_{H \max} - \delta)^{\frac{5}{2}}\delta^{\frac{1}{2}} + (d_{H \max} - \delta)^{\frac{3}{2}}\delta^{\frac{3}{2}} - 1] &= 0. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Выбирается наибольшее из трех найденных значений  $\delta$ .

В тех случаях, когда расчетное  $\delta$  меньше  $\delta_{\min}$  по всем трем критериям в функции (4.30), (4.31) и (4.32), подставленной  $\delta_{\min} = \delta$ , находят по всем трем критериям  $d_{cr}$ . Для реализации применяется максимальное из трех значений.

В заключение отметим, что оптимизация – ключевое направление системного анализа при принятии технических и управленческих решений. В разделе приведены лишь общие сведения по оптимизации решений. По математическому аппарату оптимизации, методам линейного программирования имеются обширные исследования и публикации, в которых можно при необходимости найти теорию и практические рекомендации по решению конкретных технических и управленческих задач посредством оптимизации.

### **Контрольные вопросы**

1. Сущность оптимизации и области применения оптимизационных задач.
2. Последовательность процесса постановки задач инженерной оптимизации.
3. Границы оптимизационной системы.
4. Критерии оптимизации.
5. Независимые и зависимые переменные оптимизационных задач.
6. Оптимизационные модели.
7. Целевая функция, ограничения и пределы.
8. Условная и безусловная оптимизация.
9. Классификация задач оптимизации.
10. Классификация математических моделей оптимизации.
11. Свойства функции одной переменной.
12. Понятие о непрерывной, разрывной, дискретной, монотонной, унимодальной функциях.
13. Глобальные и локальные минимумы (максимумы).
14. Достаточные условия оптимальности функции одной переменной.
15. Алгоритм определения оптимальных значений функции одной переменной в определенном интервале.

16. Алгоритм определения оптимальных значений функций двух или нескольких переменных.
17. Сущность решения оптимизационных задач методами линейного программирования.
18. Свойства оптимальной задачи при линейном программировании.
19. Графическое решение задач методом линейного программирования.
20. Приведение задач линейного программирования к стандартной форме.
21. Решение задач линейного программирования путем приведения их к каноническому виду ( метод Гаусса - Жордана).
22. Базисные и небазисные переменные.
23. Постановка и формулировка задач нелинейного программирования.
24. Сущность метода множителей Лагранжа нелинейного программирования.
25. Алгоритм решения задач по методу множителей Лагранжа.
26. Метод последовательной частной оптимизации.
27. Оптимизация параметров трубчатых валов.

## **5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ. СИСТЕМА КАЧЕСТВА**

В предыдущих разделах рассмотрены методы принятия решений в условиях полной определенности на математическом фундаменте прогнозирования и оптимизации развития систем. При решении технических и управленческих задач иногда возникает необходимость принятия решений в условиях полного или частичного отсутствия информации. При этом используются методы, посредством которых находится решение на основе обработки экспертных решений или совокупности единых решений точечной информации, в частности методы прогнозирования и оптимизации развития систем. Например, применяются методы экспертного прогнозирования развития систем или методы оптимизации для заданных условий и вариантов задач.

В настоящее время существуют теория и методы принятия решений в условиях неопределенности, когда отсутствует полная информация о ситуации, явлении, развитии объекта, а принятие решения связано с риском ошибки. Существуют следующие виды неопределенностей:

- отсутствует полная характеристика вариантов, а известны лишь единичные оценки. Для принятия решения используют метод системных матриц;
- заданы лишь вероятностные или статистические характеристики процесса, объекта, явления. Для принятия решения используются методы минимизации риска, а также проверка вероятностно-статистических гипотез;
- заданы графовые предпочтения между вариантами. Для преобразования графов используют методы комбинаторной оптимизации.

Используют следующие критерии и методы принятия решений: минимаксный, Байеса - Лапласа, Сэвиджа, Гурвица, Ходина – Лемана, Гермейера и другие. Применяют методы принятия решений на основе нечетких чисел, уравнений и множеств.

Анализ критериев, методов, теории принятия решений в условиях неопределенности не входит в программы соответствующих дисциплин, поэтому в настоящем учебном пособии не рассматривается.

Методы принятия решений в условиях неопределенности носят рекомендательный характер, и выбор окончательного решения остается за человеком – лицом, принимающим решение (ЛПР). Различают три типа неопределенностей:

- неопределенность целей;
- неопределенность знаний об окружающей обстановке и действующих в данном явлении факторов;

– неопределенность действий, сопутствующих факторов, способствующих или препятствующих развитию рассматриваемого процесса, явления, объекта.

Перечисленные неопределенности могут быть стохастическими (вероятностными), когда известные факторы статистически устойчивы и поэтому представляют собой обычные объекты теории вероятностей – случайные величины (или случайные функции, события и т.д.). При этом должны быть известны необходимые статистические характеристики (законы распределения и их параметры).

При неопределенности нестохастического вида никаких предположений о стохастической устойчивости не существует. Чаще встречается промежуточный тип неопределенности, когда решение принимается на основании каких-либо гипотез о законах распределения случайных величин. Возможно несовпадение результатов решения с реальными условиями. Эта опасность несовпадения формализуется с помощью коэффициентов риска.

## 5.1. Принятие решений в условиях риска

В условиях риска неопределенность знаний дополняется некоторыми сведениями о действующих факторах, в частности, знанием законов распределения описывающих их случайных величин.

Принятие решения в условиях риска может быть основано на одном из следующих критериев:

- критерий ожидаемого значения;
- критерий комбинации ожидаемого значения и дисперсии;
- критерий известного предельного уровня;
- критерий наиболее вероятного события в будущем.

Критерий ожидаемого значения (КОЗ) представляет собой выборочные средние значения случайной величины. Достоверность получаемого решения при этом будет зависеть от объема выборки. КОЗ может применяться, когда однотипные решения в сходных ситуациях приходится принимать многократно. То есть КОЗ имеет область применения, ограниченную практикой однотипных решений, принимаемых в аналогичных ситуациях. Этот недостаток можно устранить, если применять комбинацию КОЗ и выборочной дисперсии. Возможным критерием при этом является минимум выражения

$$E(Z, \sigma) = E(Z) \pm kU(Z), \quad (5.1)$$

где  $E(Z, \sigma)$  – критерий «ожидаемого значения – дисперсия»;

$k$  – постоянный коэффициент;

$U(Z) = m_z/S$  – выборочный коэффициент вариации.

Здесь  $m_z$  – оценка математического ожидания;

$S$  – оценка среднего квадратического отклонения.

Знак «минус» ставится в случае оценки прибыли, знак «плюс» - в случае затрат. Из зависимости (5.1) видно, что точность предсказания результата повышается при учете возможного разброса значений  $E(Z)$ , то есть введения своеобразной «страховки». При этом степень учета этой страховки регулируется коэффициентом  $k$ , который как бы управляет степенью учета возможных отклонений. Так, например, если для лица, принимающего решения, имеют большое значение ожидаемые потери прибыли, то  $k \gg 1$ , и при этом существенно увеличивается роль отклонений от ожидаемого значения прибыли  $E(Z)$  за счет дисперсии.

Критерий предельного уровня не имеет четко выраженной математической формулировки и основан в значительной степени на интуиции и опыте ЛПР. При этом ЛПР на основании субъективных соображений определяет наиболее приемлемый способ действий. Критерий предельного уровня обычно не используется, когда нет полного представления о множестве возможных альтернатив. Учет ситуации риска при этом может проводиться путем введения законов распределений случайных факторов для известных альтернатив.

Несмотря на отсутствие формализации, критерием предельного уровня пользуются довольно часто, задаваясь значениями на основании экспертных или опытных данных.

Критерий наиболее вероятного исхода предполагает замену случайной ситуации детерминированной путем замены случайной величины прибыли (или затрат) единственным значением, имеющим наибольшую вероятность реализации. Использование данного критерия, так же, как и в предыдущем случае, в значительной степени опирается на опыт и интуицию. При этом необходимо учитывать два обстоятельства, затрудняющие применение этого критерия:

- критерий нельзя использовать, если наибольшая вероятность события недопустимо мала;
- применение критерия невозможно, если несколько значений вероятностей возможного исхода равны между собой.

Учет неопределенных факторов, заданных законом распределения, также соответствует ситуации риска.

Методический учет случайных факторов, заданных распределением, может быть выполнен двумя приемами: заменой случайных параметров их математическими ожиданиями и "взвешиванием" показателя качества по вероятности (этот прием иногда называют "оптимизация в среднем").

## 5.2. Методы теории игр при принятии решений

Теоретической основой нахождения оптимального решения в условиях неопределенности и конфликтных ситуаций является теория игр. Игра – это математическая модель процесса функционирования конфлик-

тующих элементов систем, в котором действия игроков происходят по определенным правилам, называемым стратегиями.

Основной постулат теории игр – любой субъект системы делает все возможное, чтобы достигнуть своих целей. От реального конфликта игра (математическая модель конфликта) отличается тем, что она ведется по определенным правилам, которые устанавливают порядок и очередность действий субъектов системы, их информированность, порядок обмена информацией, формирование результата игры.

В играх, известных под общим названием азартных, основной вид неопределенности – это *статистическая неопределенность*. Игрок не знает заранее, как ляжет карта, или какая цифра выпадет при бросании кости.

Другой тип неопределенности характерен для так называемых игр с полной информацией (шашки, шахматы, рэндзю, решение головоломок типа кубика Рубика). В любой момент игрок обладает полной информацией о текущем положении дел. С формально-математической точки зрения принципиально возможно перебором всех возможных вариантов и прослеживанием всех возможных последствий выбрать оптимальный ход. Однако число возможных ходов и их последствий настолько огромно, что на практике этого нельзя сделать. Неопределенность этого типа называется *комбинаторной*.

Неопределенность более высокого типа связана с тем, что игрок, пусть даже обладая полной информацией на синтаксическом уровне, не может до конца выяснить ее смысл. Неопределенность этого типа называется *семантической*.

*Семантическая неопределенность* всегда существует в такой игровой ситуации, как научное познание (игра с природой). Такие постоянно развивающиеся формы, как понятия, категории, теории, включают на семантическом уровне наряду с определенностью также некоторую неопределенность. Семантической неопределенностью обладают совокупности экспериментальных данных (неизвестно, какой закон за ними кроется).

Если статистическая неопределенность связана только со структурой множества возможных ходов (своих или противника), то семантическая неопределенность связана еще и с особенностями отражения этого множества в системе (сознании игрока). В случае статистической неопределенности при незнании конкретного исхода следующего хода все же известно распределение вероятностей, а в случае семантической неопределенности неизвестны даже вероятности.

Наиболее сложный вид неопределенности в игре – это *стратегическая неопределенность*. Игрок не знает, какого образа действий придерживается противник, какие цели перед собой ставит. Неопределенность этого типа обычно несвойственна играм (в обычном смысле этого слова): цель

игры четко определена правилами. Но она присуща различным сферам человеческой деятельности (бизнес, политика и т.д.). Информация, снимающая стратегическую неопределенность, – это стратегическая информация.

Частным случаем стратегической неопределенности является неопределенность прагматическая, состоящая в незнании (вернее, в неполном знании) игроком собственных целей. Прагматическая неопределенность связана с неадекватностью и неполнотой самоотражения субъекта, с неполной информацией о себе и о своем месте в игровой ситуации.

Существует много классов игр, различающихся по количеству игроков, числу ходов, характеру функций выигрыша и т.д. Выделим следующие основные классы игр:

1) антагонистические (игры со строгим соперничеством) и неантагонистические. В первом случае цели игроков противоположны, во втором – могут совпадать;

2) стратегические и нестратегические (в первых субъект системы действует независимо от остальных, преследуя свои цели, во вторых субъекты выбирают единую для всех стратегию);

3) парные игры и игры для  $N$  лиц;

4) коалиционные и бескоалиционные;

5) кооперативные и некооперативные (в первых возможен обмен информацией о возможных стратегиях игроков);

6) конечные и бесконечные (в первых – конечное число стратегий).

Наибольшее распространение в технических приложениях имеют парные стратегические, бескоалиционные, конечные, некооперативные игры. Модель проблемной ситуации в этом случае имеет вид

$$\langle U, V, W_1, W_2, R_1, R_2 \rangle, \quad (5.2)$$

где  $U$  – множество стратегий оперирующей стороны (конструктора);

$V$  – множество стратегий оппонирующей стороны (технолог и природа);

$W_1$  и  $W_2$  – показатели качества игроков;

$R_1$  и  $R_2$  – системы предпочтения игроков.

Системы предпочтения игроков, в свою очередь, основываются на двух ведущих принципах рационального поведения: принципе наибольшего гарантированного результата и принципе равновесия. Первый основан на том, что рациональным выбором одного из игроков должен считаться такой, при котором он рассчитывает на самую неблагоприятную для него реакцию со стороны другого игрока. Второй принцип гласит, что рациональным выбором любого игрока считается такая стратегия  $u\$$  (или  $v\$$ ), для которого ситуация  $(u\$, v\$)$  обоюдовыгодна: любое отклонение от данной ситуации игры не является выгодным ни для одного из игроков.

Решается парная матричная игра ( проектируемое изделие – меры и средства противодействия) с нулевой суммой ( выигрыш одной стороны равен проигрышу другой) на основе рассмотрения платежной матрицы,



которая представляет собой совокупность значений  $U$  и  $V$  (пара стратегий  $(u, v)$   $U \times V$  называется ситуацией игры), а также выигрышей  $W_{ij}$  при парном сочетании всевозможных стратегий сторон. Решение парной матричной игры может быть в чистых стратегиях, когда для каждой из сторон может быть определена единственная оптимальная стратегия, отклонения от которой невыгодны обоим игрокам. Если выгодно использовать несколько стратегий с определенной частотой их чередования, то решение находится в смешанных стратегиях.

Основная особенность использования методов теории игр заключается в том, что в качестве возможных стратегий со стороны проектируемой системы рассматриваются возможные варианты ее строения, из которых следует выбрать наиболее рациональный. В качестве стратегий противника рассматриваются возможные варианты его противодействия, стратегии их применения. Число стратегий может быть расширено благодаря реализации «гибких» решений. Анализ игровых ситуаций в этом случае может быть направлен не только на выбор рационального варианта проектируемого изделия, но и на определение алгоритмов рационального применения системы в конфликтной ситуации.

Другая особенность применения методов теории игр заключается в выборе решений, получаемых на основе анализа конфликтной ситуации. В теории игр доказывается теорема о том, что оптимальная стратегия для каждого из игроков является оптимальной и для другого игрока.

Как уже отмечалось, выбор метода анализа ЛПР определяется условиями, в которых принимаются решения. Эти условия классифицируются по степени точности и уверенности в результатах решений. Имеются три основные категории состояния ЛПР: уверенность, риск и неопределенность.

В условиях уверенности выбирается альтернатива, которая дает наибольшее (наименьшее) значение основного критерия.

В условиях неопределенности могут быть четыре направления принятия решений: *maximin*, *maximax*, *laplace*, *minimax regret*.

*Maximin* (максимум из минимума) – выбор решения с лучшим из всех худших результатов – пессимистический метод, потому что он принимает во внимание только самый плохой из всех возможных результатов.

*Maximax* (максимум из максимума) – выбор решения с лучшим из всех лучших результатов – оптимистический, наступательный метод, в котором не принимается во внимание никакой возможный результат, кроме самого лучшего.

*Laplace* – выбор решения с наилучшим средним значением результата. В методе предполагается, что все результаты, и худшие, и лучшие, равновероятны.

*Minimax regret* – выбор решения с лучшим из худших возможных последствий.

### 5.3. Система менеджмента качества

Системный анализ и системный подход пронизывают все стороны деятельности предприятия. Они проявляются, в частности, в проектном подходе при проектировании и эксплуатации машин и оборудования, в менеджменте. В соответствии с требованием ГОСТ Р ИСО 9000-2008 [19] «В проектном подходе проект понимается как уникальный процесс, состоящий из совокупности скоординированных и управляемых видов деятельности с начальной и конечной датами, предпринимаемой для достижения цели, соответствующей конечным требованиям, и включающий ограничения по срокам, стоимости и ресурсам».

Качество выполнения проекта определяется его стоимостью, временем реализации и содержанием и наглядно представляется «пирамидой управления», изображающей иерархию параметров, влияющих на качество выполнения проекта (рис. 5.1).

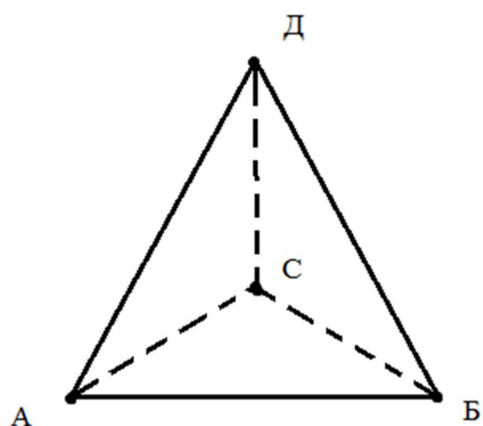


Рис. 5.1. Пирамида управления проектами:  
А – стоимость; Б – время; С – содержание;  
Д – качество

Повышение качества проектов – важнейшее направление деятельности предприятий. Одним из существенных отличий данного этапа от предыдущего стало появление аудиторских служб по качеству, которые, в отличие от отделов технического контроля, занимались не выявлением бракованной продукции, а проверяли работоспособность всей системы обеспечения качества путем исследования небольших выборок из партии изделий.

Таким образом, главная цель – оградить потребителя от бракованной продукции – осталась неизменной, а методы контроля качества по прежнему играли весьма значительную роль. Однако акцент был перенесен с поддержания определенного уровня качества изделий на управление производственными процессами с целью снизить количество бракованной продукции. Системы мотивации начинают смещаться в сторону «человеческого фактора», а материальное стимулирование уступает место моральному. Все больше внимания уделяется обучению персонала. Например, в Японии и Южной Корее каждый работник в среднем находится на обучении от нескольких недель до одного месяца в год [18].

Несмотря на то, что теоретическая база данного этапа была заложена в основном учеными из Западной Европы и Америки, явным лидером в их реализации стала Япония. Так, именно в Японии была на практике реализована модель управления качеством на основе так называемых циклов

Деминга – Джурана, включающих четыре фазы: планирование, выполнение, контроль и совершенствование продукции (рис. 5.2) [19, 20].



Рис. 5.2. Цикл Деминга – Джурана

Продолжается распространение статистических методов контроля качества, способствующих сокращению затрат времени на контрольные операции и повышению эффективности контроля. Совершенствование методов контроля качества было, помимо всего прочего, вызвано рядом открытий в области исследования операций, кибернетики, схемотехники и общей теории систем.

Теоретическим обобщением этапа управления качеством можно считать модели Эттингера – Ситтига (рис. 5.3) и Джурана (рис. 5.4). Первая, более ранняя, учитывает как необходимость управлять функциональным качеством, так и влияние спроса на качество продукции. Следует отметить, что изучение потребительского спроса стало первым этапом каждого цикла управления качеством продукции.

Дальнейшее развитие системы управления качеством продукции получили в трудах американского специалиста Д. Джурана. Его модель представляет собой восходящую спираль, а не какую-либо замкнутую форму. Такая спираль отображает непрерывное формирование и улучшение качества продукции. Модель включает 13 этапов (см. рис. 5.4).



Рис. 5.3. Модель управления качеством по Эттингеру – Ситтигу

Модель Джурана ориентируется на маркетинговую концепцию производственно-коммерческой деятельности предприятия. Она предусматривает постоянное изучение спроса на рынке сбыта и эксплуатационных показателей качества продукции, что обуславливает полную ориентацию производства на требования потребителей и рынок сбыта. При этом каждый цикл управления качеством начинается и заканчивается изучением рынка. На этом этапе сложилась современная концепция управления качеством, когда противоречие между повышением качества продукции и увеличением эффективности производства удалось преодолеть: применение новых методов управления позволило, повышая качество, снижать издержки производства.

В конце 60-х годов на смену всеобщему контролю качества (TQC) пришло всеобщее управление качеством (TQM), которое представляет собой комплексную систему, ориентированную на постоянное улучшение качества, минимизацию производственных затрат и поставку точно в срок. Основные элементы TQM изображены на рис. 5.5.

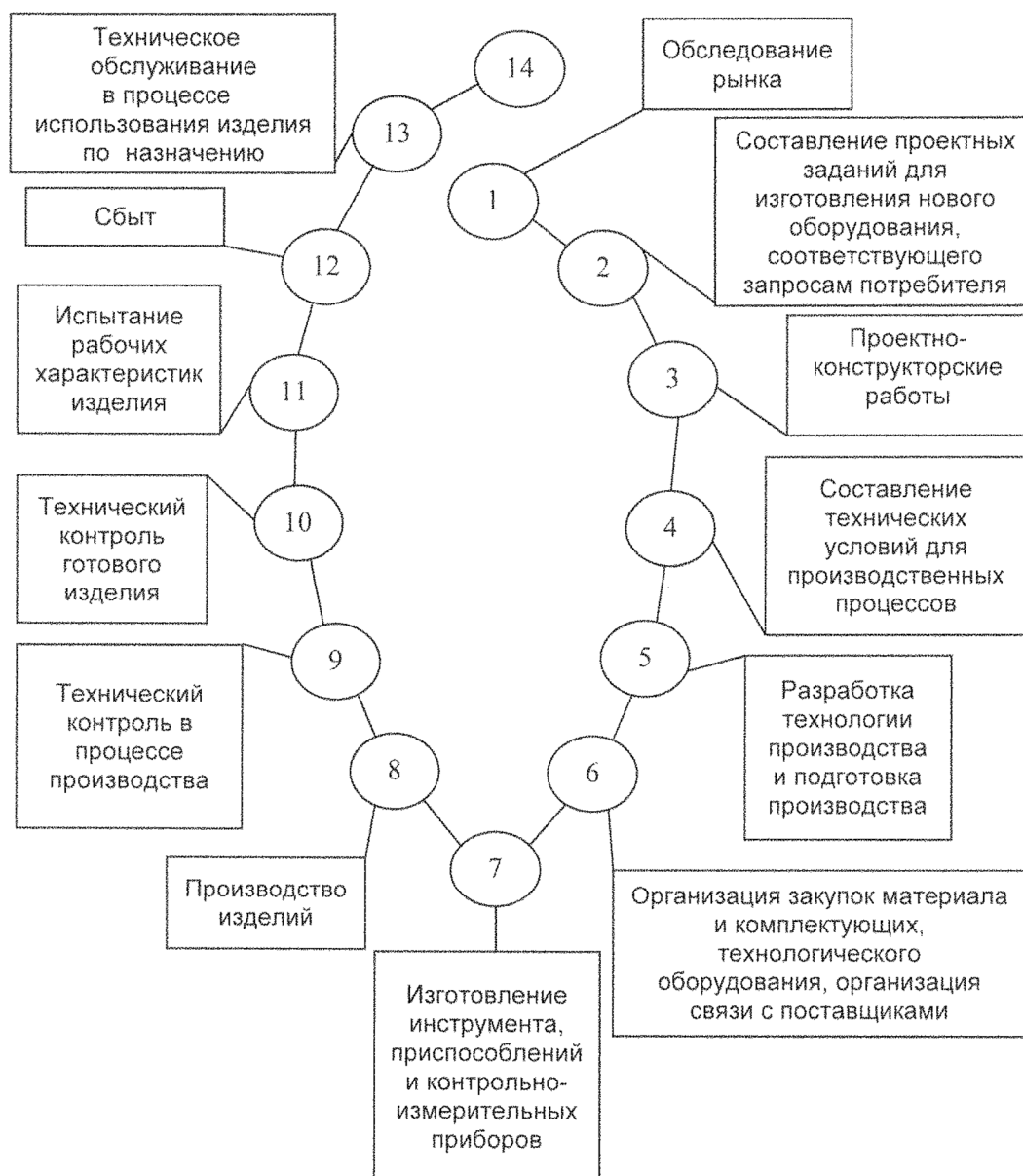


Рис. 5.4. Модель управления качеством по Джурану



Рис. 5.5. Основные элементы TQM

***Контрольные вопросы***

1. Методы принятия решений в условиях неопределенности.
2. Типы неопределенности.
3. Особенности принятия решений в условиях риска.
4. Сущность методов теории игр при принятии решений.
5. Сущность системы менеджмента качества.
6. Цикл и модели управления качеством Деминга – Джурана.
7. Структура всеобщего контроля качеством.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. – М.: Машиностроение, 2003. – 384 с.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
3. Каменев А.Ф. Развитие параметров бумагоделательных машин/ А.Ф. Каменев, И.Д. Кугушев, Н.Н. Куликов, О.К. Федотов. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 192 с.
4. Каменев А.Ф. Технические системы: закономерности развития. – Л.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
5. Санников А.А., Куцубина Н.В. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли: учебное пособие. – Екатеринбург. Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. – 118 с.
6. Самойлович В.Г. Прогнозирование оптимального технико-экономического уровня машин. М.: Машиностроение 1987. – 136 с.
7. Саркисян С.А. Научно-техническое прогнозирование и программно-целевое планирование в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
8. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 285 с.
9. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
10. Уалйд Д. Оптимальное проектирование. – М.: Мир, 1981. – 272 с.
11. Реклейтис Г., Рэгсдел К. Оптимизация в технике; в 2-х т. – М.: Мир, 1986. – Т1 – 279 с. – Т2. – 320 с.
12. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас. – Л.: Машиностроение, 1989. – 144с.
13. Дегтярев Ю.Н. Системный анализ и исследование операций: учебник. –М.: Высш. шк., 1996. – 335 с.
14. Корнилова Т.В. Психология риска и принятие решения: учебное пособие для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2003. – 286 с.
15. Попов В.И., Касвенов В.С., Савченко И.П. Системный анализ в менеджменте: учебное пособие; под ред. В.И. Попова. – М.: КНОРУС, 2007. – 304 с.

16. Анголенко Н.И. Системное руководство организацией: учебник. – М.: Экзамен, 2006. – 414 с.

17. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учебное пособие. – Москва: Проспект, 2010. – 176 с.

18. Вильям Дж. Стивенсон. Управление производством / Пер. с англ. – М.: ООО «Издательство «Лаборатория бытовых знаний», ЗАО Издательство «Бином». 1998. – 928 с.

19. ГОСТ Р ИСО 9000-2008. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Мед. 2008-12-18 М.: Стандартиформ, 2009 – 35 с.

20. Мазур И.И., Шапиро В.Д. Управление качеством: учеб. пособие для студентов вузов; под общ. ред. И.И. Мазура. – 2-е изд. – М.: Омега-Л, 2005. – 400 с.



Учебное издание

*Александр Александрович Санников*

*Нелли Валерьевна Куцубина*

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ  
ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ**

ISBN 978-5-94984-539-4



Редактор А.Л. Ленская  
Компьютерная верстка О.А. Казанцевой

---

Подписано в печать

Печать офсетная

Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 8,14

Тираж 100 экз.

Уч.-изд. л

Заказ №

---

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37  
Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Отпечатано с готового оригинал-макета  
Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ»  
620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 3